

ANDRZEJ MRUK*

WPLYW OBECNOŚCI SADZY W OLEJU SILNIKOWYM NA JEGO WŁASNOŚCI TRIBOLOGICZNE

EFFECT OF SOOT CONTENTS IN ENGINE OIL ON ITS TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań własności smarnych dla dwu olei silnikowych: mineralnego i syntetycznego, zawierających: 1 g, 2,5 g i 5 g sadzy w 100 ml oleju. Badania własności przeprowadzono na aparacie czterokulowym T-02 i testerze T-05 dla skojarzenia: rolka-kłosek. Badania pokazały istotny negatywny wpływ cząstek sadzy znajdującej się w oleju na własności tribologiczne takiego środka smarnego. Wyniki badań potwierdzają fizyczny model ściernego oddziaływania cząstek sadzy znajdującej się w oleju na współpracujące powierzchnie par tribologicznych.

Słowa kluczowe: sadza, olej, silnik spalinowy, zużycie

Abstract

The article presents testing results of lubricating ability of the oils with soot particles. Tests were carried out for two soot-containing oils: mineral and synthetic, with 1 g, 2,5 g and 5 g of soot in 100 ml of the oil. The characteristics were examined using a four-ball tester T-02 and a T-05 tester for the matching pair: roller-block. Performed tests showed an essential negative effect of soot particles occurring in oil on tribological characteristics of such a lubricant. Presented test results confirm the physical model of abrasive effect of soot particles occurring in oil on tribological pair matching surfaces.

Keywords: soot, oil, engine, wear

* Dr hab. inż. Andrzej Mruk, prof. PK, Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

We współczesnych silnikach wysokoprężnych w celu spełnienia coraz ostrzejszych wymogów ekologicznych odnośnie do emisji tlenków azotu NO_x stosowana jest recyrkulacja spalin. W spalinach silnika znajdują się różne związki toksyczne (CH , NO_x , CO) oraz cząstki stałe, których dominującym składnikiem jest sadza [10]. Przy maksymalnej recyrkulacji do cylindra podawane jest z zasysanym powietrzem do ok. 0,05 g sadzy (cząstek stałych) na 1 kWh. Pewna ilość sadzy nie ulega spaleni i osadza się na ściankach cylindra. Sadza ta wraz z filmem olejowym jest zgarniana przez pierścienie i przedostaje się do obiegu oleju. Cząstki sadzy w oleju mogą również pochodzić z przedmuchi do skrzyni korbowej, jak i powstawać w wyniku destrukcji oleju. Część cząstek stałych wychwytywana jest przez filtry oleju, a pozostała krąży w obiegu oleju smarującego pary trybologiczne.

Stwierdzono, że występująca w oleju silnikowym sadza powoduje zwiększone zużycie powierzchni par trących, w których występują tarcie graniczne, płynne i mieszane [2, 6, 8, 13, 14, 17, 18]. Wzrost zużycia współpracujących ze sobą powierzchni par ciernych silnika wraz z obecnością sadzy w oleju silnikowym, wyjaśniany jest:

- negatywnym oddziaływaniem sadzy na dodatki uszlachetniające olej,
- ściernym działaniem cząstek sadzy.

Występująca w eksploatowanych olejach silnikowych sadza obniża własności przeciwzużyciowe dodatków metaloorganicznych – diatilo(arylo)ditiofosforanu cynku (ZDTP) [1, 11, 17]. Według innego podejścia przyczyną jest adsorpcja produktów rozkładu dodatku na sadzy, a nie na powierzchni tarcia [11–14].

Ścierny mechanizm działania cząstek sadzy potwierdzają badania przeprowadzone dla oleju bez żadnych dodatków uszlachetniających, jak i prowadzone tylko z sadzą pomiędzy powierzchniami współpracującymi [6, 7]. Na powierzchniach współpracujących stwierdzono ślady zużycia świadczące o występowaniu zużycia ściernego.

W niniejszym artykule podjęto badania nad zagadnieniem wpływu sadzy w oleju silnikowym (do 5% udziału masowego) na opory ruchu i zużycie par trących.

2. Przygotowania zawiesin sadzy w oleju

Do przeprowadzenia badań własności tribologicznych oleju silnikowego z cząstkami sadzy niezbędne było przygotowanie odpowiednich zawiesin sadzy w oleju (ilość sadzy: do 5% udziału wagowego). Ze względu na brak możliwości pozyskania w odpowiedniej ilości sadzy powstałej podczas spalania w silniku zastosowano zamiennie sadzę techniczną o odpowiedniej charakterystyce. Przyjmuje się, że wewnętrzna struktura cząstek sadzy technicznej jest zbliżona do sadzy silnikowej. Po analizie dostępnych sadz technicznych do badań wytypowano sadzę produkcji rosyjskiej o symbolach N-220 i N-330. Wybrane własności fizykochemiczne sadz zestawiono w tab. 1.

Cząstki sadzy technicznej użytej do badań pokazano na fot. 1, a na fot. 2 sadzę pochodzącą ze spalin silnika wysokoprężnego. Struktury poszczególnych cząstek sadzy technicznej i silnikowej są podobne.

Zawiesina sadzy w oleju może być zaliczona do układu dyspersyjnego o ciekłej fazie ciągłej. Sporządzając zawiesinę, do oleju silnikowego dodawano ściśle określoną ilość sadzy technicznej. Dla uzyskania jednorodności zawiesiny sadzę z olejem mieszano me-

chanicznie za pomocą mieszadeł. Mechaniczne mieszanie powodowało dyspergowanie sadzy i rozbijanie agregatów sadzowych. Sporządzono zawiesiny o udziale wagowo-objętościowym sadzy w oleju: 1%, 2,5%, 5%, tj. odpowiednio: 1 g, 2,5 g, 5 g sadzy zmieszano z 100 ml oleju. Zastosowana do badań sadza techniczna miała średni wymiar granuli 25–32 μm .

Tabela 1

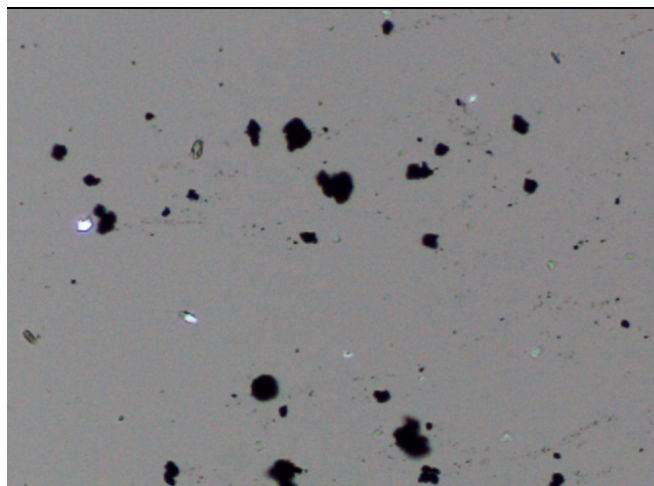
Wybrane własności fizykochemiczne sadz

Symbol sadzy	Średnia arytmetyczna średnica cząstek [nm]	Powierzchnia właściwa CTAB [m^2/g]	Liczba absorpcji DBP [$\text{cm}^3/100\text{g}$]	Części lotne [%]	Gęstość nasypowa [kg/m^3]
N-220	25	111 +/- 5	114 +/- 5	4	345 +/- 30
N-330	32	82 +/- 6	102 +/- 5	4	375 +/- 30

Badania przeprowadzono dla dwu olejów silnikowych:

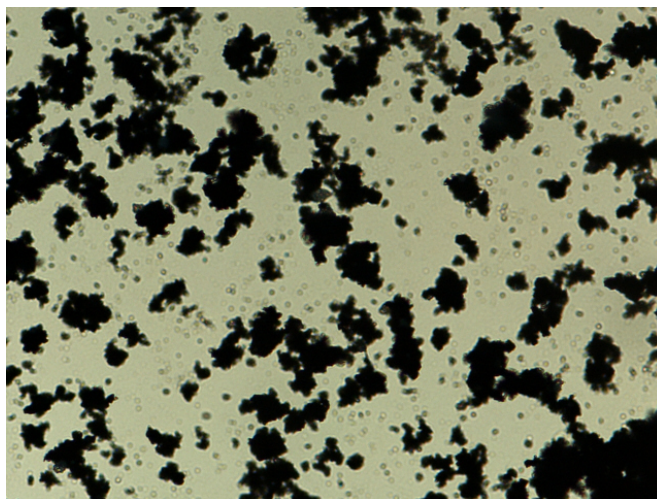
- mineralnego SAE 30, do lekkich warunków pracy, firmy Esso,
- syntetycznego SAE 15–40, dla szybkoobrotowych turbodoładowanych silników wysokoprężnych, firmy Castrol.

Tak przygotowaną zawiesinę stosowano w badaniach tribologicznych.



Fot. 1. Cząstki sadzy technicznej użytej do badań

Photo 1. Technological soot particles used for testing



Fot. 2. Sadza pochodząca ze spalin silnika wysokoprężnego

Photo 2. Soot from diesel exhausts gas

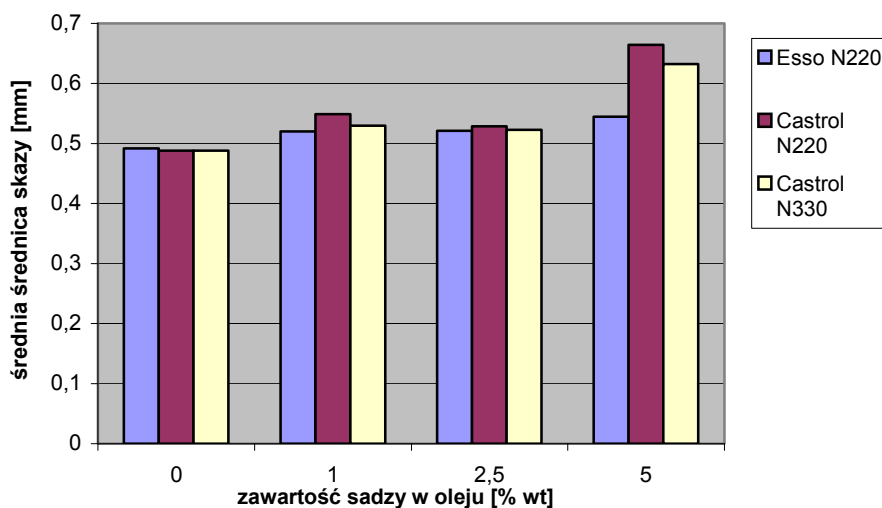
3. Badania własności smarnych oleju z dodatkiem sadzy

Badania własności smarnych przeprowadzono dla styku skoncentrowanego punktowego na aparacie czterokulowym (tester T-02 produkcji ITiE) i dla skojarzenia: rolka-kłosek (tester T-05 produkcji ITiE) [20].

3.1. Badania na aparacie czterokulowym (T-02)

Elementami testowymi były kulki wykonane ze stali łożyskowej ŁH-15 (wg normy PN-75/M-86452). Badania wskaźnika zużycia przeprowadzono przy stałym obciążeniu 392,4 N (40 kG) i prędkości obrotowej wrzeciona 1450 obr./min w czasie 1 h (3600 s). Po zakończonych biegach badawczych oceniano średnicę skazy na kulkach testowych. Średnicę skazy mierzono mikroskopem warsztatowym z dokładnością 0,001 mm. Pomiar przeprowadzano w dwu prostopadłych do siebie kierunkach, wzdłuż i prostopadle do śladów zużycia. W czasie testów (badań) mierzono opory ruchu i temperaturę środka smarnego. Siłę tarcia mierzono układem tensometrycznym, temperaturę termoparą, które sprzężone z przetwornikiem firmy HBM i komputerem stanowiły tor pomiarowy i rejestrujący. Wyniki badań wpływu zawartości sadzy w oleju na właściwości smarne określone przez średnią średnicę skazy (średnicę śladu zużycia) przedstawiono na wykresach (rys. 1).

Analiza wyników badań pokazuje, że obecność sadzy w oleju powoduje zwiększenie zużycia elementów węzła tarcia – kulek. Wraz ze wzrostem zawartości sadzy wzrasta średnia średnica skazy – średnica śladu zużycia. Porównanie średnic skaz dla oleju czystego i dla oleju z udziałem sadzy w zakresie 1–2,5% wt pokazuje na wzrost średnic, odpowiednio: o ok. 5% dla oleju mineralnego i o ok. 10% dla oleju syntetycznego. Dla 5% wt udziału sadzy w oleju wzrost średnic wynosi, odpowiednio, o ok. 10% i o ok. 30%.



Rys. 1. Wpływ zawartości sadzy N-220 i N-330 w oleju mineralnym (Esso) i syntetycznym (Castrol) na średnią średnicę skazy powstałej na kulkach testowych

Fig. 1. Effect of N-220 and N-330 soot contents in mineral oil (Esso) and synthetic oil (Castrol) on the medium scar diameter, occurring on the test spheres

Większy niekorzystny wpływ sadzy w przypadku oleju syntetycznego można tłumaczyć antagonistycznym oddziaływaniem sadzy na dodatki tribologiczne stosowane w tym oleju. Przyczyny tego antagonizmu najczęściej upatruje się w adsorpcji na powierzchni sadzy cząstek dodatków tribologicznych, co obniża stężenie dodatku w oleju i na powierzchni tarcia.

Stwierdzono, że zwiększenie ilości sadzy w oleju zarówno mineralnym, jak i syntetycznym powoduje wzrost maksymalnej wartości siły tarcia. Dla czystego oleju mineralnego maksymalna wartość siły tarcia osiąga wartość 1,7 N, dla oleju z sadzą ok. 1,8 N, a dla oleju syntetycznego, odpowiednio, 1,65 N i 1,7–1,8 N. Po osiągnięciu maksymalnej wartości siła tarcia stabilizuje się, by następnie po pewnym czasie nieznacznie monotonicznie zmniejszać się. Jest to prawdopodobnie spowodowane usuwaniem produktów zużycia i sadzy ze strefy styku (strefy tarcia).

Przebiegi zmiany temperatury dla czystych olei i z dodatkiem sadzy w funkcji czasu trwania próby były podobne. Większy przyrost temperatury w czasie badań dla olei z sadzą wynika z większych sił tarcia w strefie styku, a tym samym większej ilości wyzwalanego ciepła.

3.2. Badania na testerze T-05 (rola kłosek)

Badania przeprowadzone na testerze T-05 wykazały, że obecność sadzy w większym stopniu wpływa na własności oleju syntetycznego. W związku z tym kolejne badania wpływu obciążenia styku skojarzenia rolka–klocek na opory ruchu przeprowadzono dla węzła tarcia smarowanego olejem syntetycznym z dodatkiem sadzy. W czasie testów (badań)

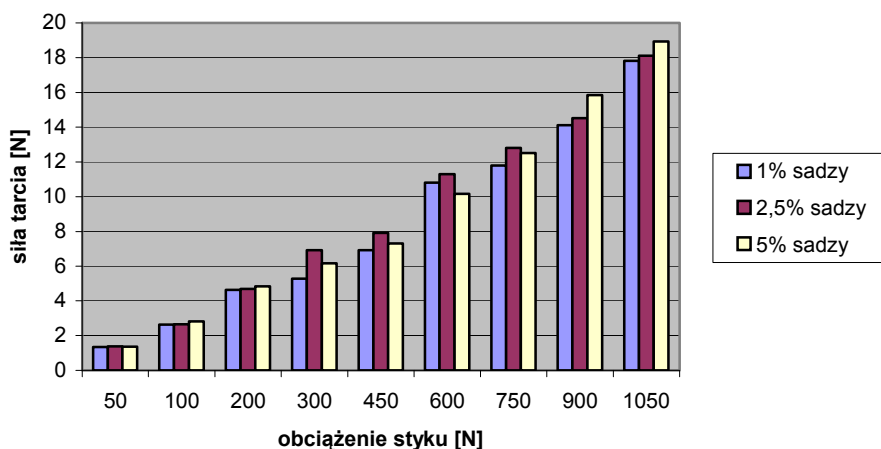
mierzono opory ruchu – siłę tarcia i temperaturę środka smarnego. Siłę tarcia mierzono układem tensometrycznym, temperaturę termoparą, które sprzężone z przetwornikiem i komputerem stanowiły tor pomiarowy i rejestrujący. Pomiar zużycia współpracujących elementów przeprowadzano metodą wagową z dokładnością 0,001 g.

Parametry pracy węzła tarcia:

- obciążenia: 50, 100, 200, 300, 450, 600, 750, 900, 1050 N,
- prędkości obrotowe wrzeciona: 500 obr./min, co odpowiada prędkości poślizgu 0,91 m/s.

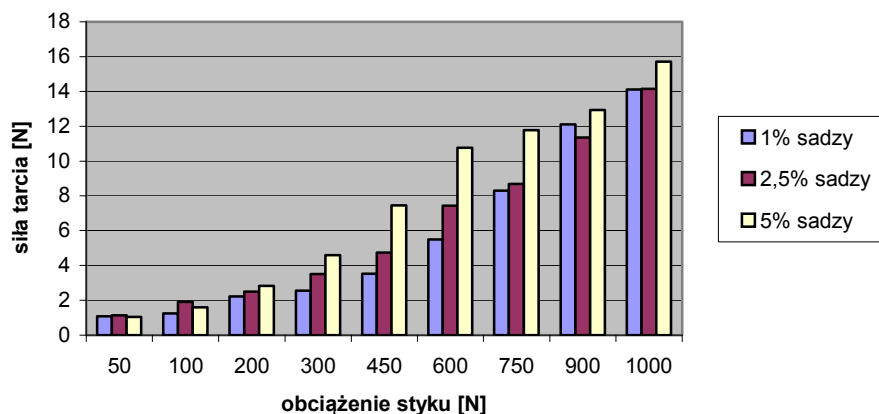
Wyniki badań wpływu obciążenia styku węzła tarcia na siłę tarcia dla różnych środków smarnych przedstawiono na rys. 2 i 3. Na podstawie zmierzonych sił tarcia wyznaczono wartości współczynnika tarcia. Zależność współczynnika tarcia od obciążenia przedstawiono na rys. 4 i 5.

Analizując zmiany siły tarcia w funkcji obciążenia styku, dla węzła tarcia smarowanego olejem z 1%, 2,5% i 5% wt udziałem sadzy można stwierdzić, że charakter przebiegu zmian jest zbliżony. Opory ruchu (siła tarcia) węzła smarowanego olejem z dodatkiem sadzy N-220 były większe niż z dodatkiem sadzy N-330. Współczynnik tarcia był największy dla małych obciążeń styku. Dla sadzy N-220 wraz ze wzrostem obciążenia wartość współczynnika malała, aby następnie stabilizować swoją wartość. Dla sadzy N-330 wraz ze wzrostem obciążenia wartość współczynnika tarcia malała, aby następnie wzrastać.



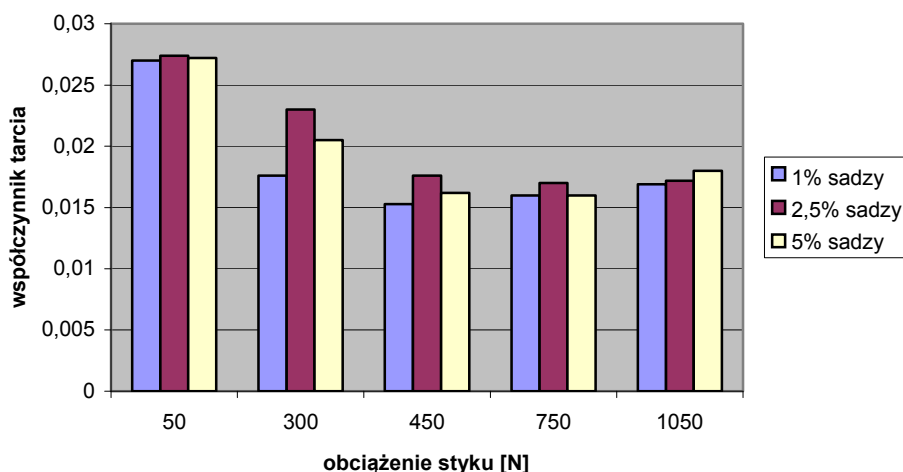
Rys. 2. Wpływ obciążenia styku węzła tarcia na siłę tarcia; środek smarny: olej syntetyczny z udziałem sadzy N-220, prędkość poślizgu $v = 0,91$ m/s

Fig. 2. Effect of a friction node contact load on friction force; lubricant: synthetic oil with N-220 soot rubbing speed $v = 0,91$ m/s



Rys. 3. Wpływ obciążenia styku węzła tarcia na siłę tarcia; środek smarny: olej syntetyczny z udziałem sadzy N-330, prędkość poślizgu $v = 0,91$ m/s

Fig. 3. Effect of a friction node contact load on friction force; lubricant: synthetic oil with N-330 soot rubbing speed $v = 0,91$ m/s



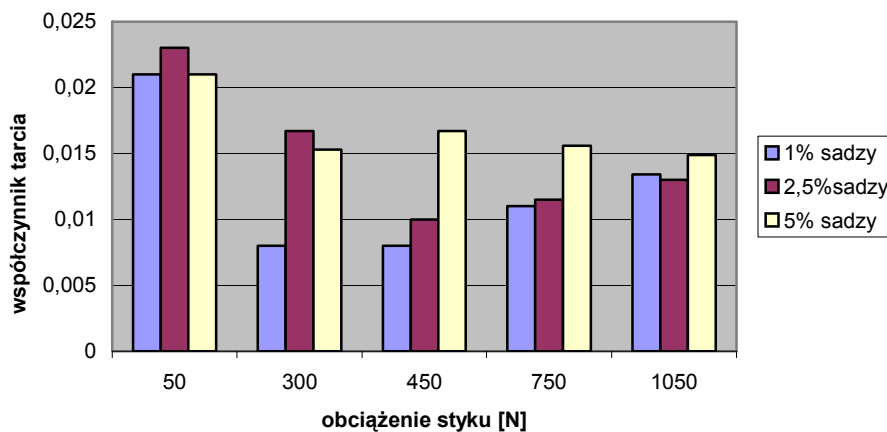
Rys. 4. Wpływ obciążenia styku na współczynnik tarcia; węzeł tarcia smarowany olejem syntetycznym z 1%, 2,5% i 5% wt udziałem sadzy N-220, prędkość poślizgu $v = 0,91$ m/s

Fig. 4. Effect of contact load on coefficient of friction; friction node lubricated using synthetic oil with 1%, 2,5% and 5% of N-220 soot; rubbing speed $v = 0,91$ m/s

Zmiany temperatury masowej klocka dla obciążeń w zakresie do 300 N wynosiły $\Delta t = 2-8^{\circ}\text{C}$, a w zakresie 300–1050 N, odpowiednio, $\Delta t = 6-13^{\circ}\text{C}$. Większe wartości zmian występowały dla zawiesin z większym udziałem sadzy.

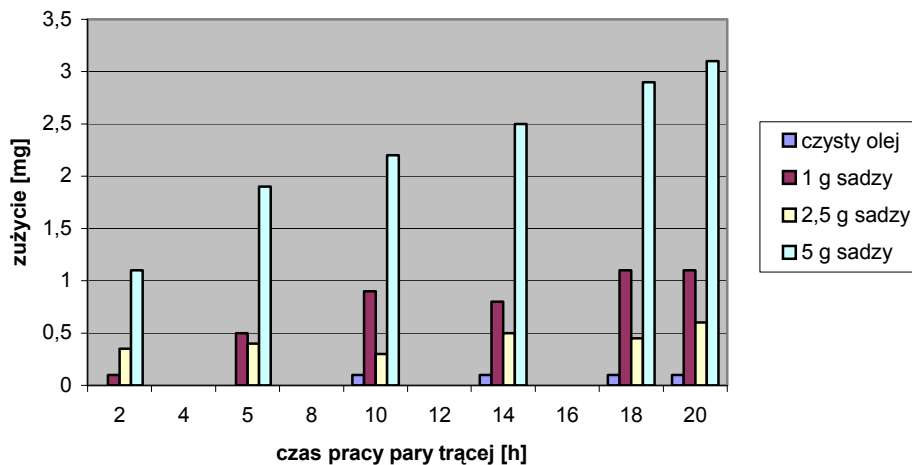
Luźne cząstki sadzy znajdujące się w oleju, przedostając się w obszar styku współpracujących powierzchni, przerywają warstwę filmu olejowego. Mogą też zachowywać się jak cząstki mikroskrawające. Zwiększając nacisk styku, odległość pomiędzy powierzch-

niami współpracującymi się zmniejsza. Skutkuje to tym, że mniejsza liczba cząstek sadzy dostaje się z olejem w strefę tarcia. Zmniejszenie ilości sadzy w obszarze styku powoduje obniżenie wartości współczynnika tarcia.



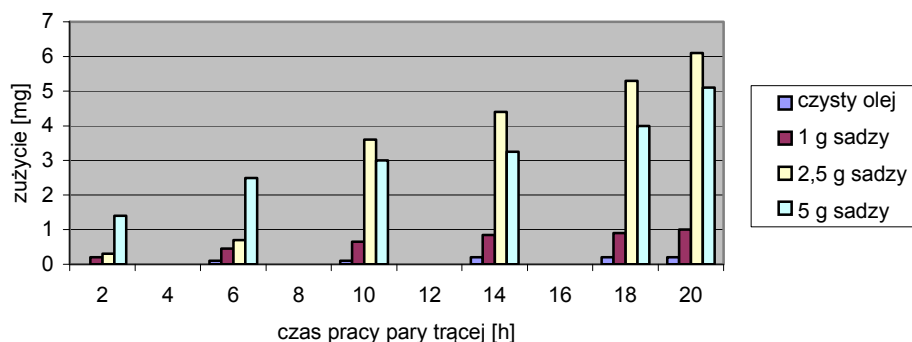
Rys. 5. Wpływ obciążenia styku na współczynnik tarcia; węzeł tarcia smarowany olejem syntetycznym z 1%, 2,5% i 5% wt udziałem sadzy N-330, prędkość poślizgu $v = 0,91$ m/s

Fig. 5. Effect of contact load on coefficient of friction; friction node lubricated using synthetic oil with 1%, 2.5% and 5% of N-330 soot; rubbing speed $v = 0,91$ m/s



Rys. 6. Zależność zużycia próbki od czasu pracy pary trącej; para smarowana olejem syntetycznym z 1%, 2,5% i 5% wt udziałem sadzy N-220, prędkość poślizgu $v = 0,91$ m/s

Fig. 6. Relationship between the wear of the sample and the friction pair work time; pair lubricated using synthetic oil with 1%, 2.5% and 5% of N-220 soot; rubbing speed $v = 0,91$ m/s



Rys. 7. Zależność zużycia przeciwpróbki od czasu pracy pary trącej; para smarowana olejem syntetycznym z 1%, 2,5% i 5% wt udziałem sadzy N-220, prędkość poślizgu $v = 0,91$ m/s

Fig. 7. Relationship between the wear of the counter sample and the friction pair work time; pair lubricated using synthetic oil with 1%, 2,5% and 5% of N-220 soot; rubbing speed $v = 0,91$ m/s

Średnia średnica cząstek sadzy N-220 jest mniejsza niż cząstek N-330. W związku z tym liczba cząstek, która wraz z olejem dostaje się pomiędzy współpracujące powierzchnie, jest większa. To powoduje, że przy takich samych naciskach styku współczynnik tarcia dla zawiesiny sadzy N-220 w oleju ma większą wartość.

Wyniki badania zużycia w funkcji czasu przedstawiono na rys. 6 i 7. Parametry pracy węzła tarcia: obciążenie 200 N, prędkość obrotowa wrzeciona 500 obr./min co odpowiada prędkości poślizgu 0,91 m/s.

Analiza wyników zużycia elementów pary trącej w funkcji czasu pokazuje bardzo istotny wpływ sadzy na ich zużycie. Zużycie to, w całym badanym okresie, jest wielokrotnie większe od zużycia pary trącej smarowanej czystym olejem. Największe zużycie próbki występowało dla 5% wt zawiesiny sadzy w oleju. Dla zawiesiny 2,5% wt uzyskano mniejsze zużycie niż należało oczekiwać, ale można to tłumaczyć efektem przenoszenia cząstek z przeciwpróbki, co było widać po zużyciu przeciwpróbki.

4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdzają istotny negatywny wpływ cząstek sadzy znajdujących się w oleju silnikowym na właściwości tribologiczne takiego środka smarnego. Dla dwu różnych rodzajów węzłów tarcia: o skoncentrowanym styku punktowym czterech kul (aparatus czterokulowy), ze stykiem rozłożonym dla skojarzenia rolka-kłoczek (tester T-05), smarowanych olejem zawierającym cząstki sadzy, stwierdzono, w porównaniu do węzłów smarowanych czystym olejem, wzrost sił tarcia oraz zużycia elementów ze sobą współpracujących. Wartość sił tarcia i zużycia wzrasta wraz ze zwiększeniem ilości sadzy w oleju. Wzrost ten jest bardzo wyraźny dla 5% udziału sadzy w oleju.

Badania przeprowadzone dla styku punkowego wykazały, że wskaźnik zużycia uzyskany dla oleju sadzy N-220 jest większy niż dla sadzy N-330. Sadza N-220 ma mniejszą średnią średnicę cząstek i większą powierzchnię właściwą. Badania dla styku rozłożonego w węzle tarcia rolka-kłoczek wykazały także, że dla tych samych obciążeń siła tarcia dla oleju z sadzą N-220 jest większa niż z sadzą N-330.

Przy takich samych obciążeniach styku, a tym samym takich samych odległościach pomiędzy powierzchniami styku, mniejsze cząstki łatwiej przedostają się wraz z olejem w strefę tarcia i oddziałują na przebieg zjawisk tribologicznych. Cząstki sadzy znajdujące się w oleju, gdy przedostaną się w obszar tarcia współpracujących elementów, mogą zostać zablokowane pomiędzy wierzchołkami mikronierówności współpracujących powierzchni. Cząstki te w miejscu ich styku z powierzchnią przerywają warstwę oleju w strefie tarcia. Utwierdzone cząstki mogą w miarę upływu czasu rozbudowywać się w większe cząstki poprzez adsorbcję kolejnych cząstek sadzy, jak i innych cząstek, które znajdują się w oleju. Cząstki te same mogą zachowywać się jak cząstki mikroskrawające.

Badania wpływu obciążenia styku pokazały, że współczynnik tarcia dla węzła tarcia smarowanego olejem zawierającym sadzę był największy dla małych obciążeń. Zwiększenie nacisku styku powodowało zmniejszenie odległości pomiędzy powierzchniami tworzącymi węzeł tarcia. Skutkiem tego pomiędzy współpracujące powierzchnie przedostawało się wraz z olejem mniej cząstek sadzy. Zmniejszenie ilości sadzy powodowało obniżenie wartości współczynnika tarcia.

Wyniki przeprowadzonych badań, których podsumowanie przedstawiono powyżej, potwierdzają model fizycznego ściernego oddziaływanie cząstek sadzy znajdującej się w oleju na współpracujące powierzchnie par trybologicznych. Pozwala to na sformułowanie następujących wniosków końcowych:

- wraz ze wzrostem ilości sadzy w oleju wzrastać będzie zużycie współpracujących ze sobą powierzchni,
- wzrost obciążenia styku może powodować mniejszą liczbę cząstek sadzy w strefie tarcia.

Literatura

- [1] Berbezier J., Martin J.H., Kapsa P., *The role of carbon in lubricated mil wear*, Tribology Int., 19, 1986, 115-122.
- [2] Dennis A.J., Garner C.P., Taylor D.H., *The effect of EGR on diesel Engine Wear*, SAE Technical Paper, Series 1999, 1999-01-0839.
- [3] Gautman M., Chitoor K., Balla S., *Contribution of soot contaminated oils to wear*, SAE Technical Paper, Series 1999, 1999-01-1591.
- [4] Gautman M., Durbha M., Chitoor K., Jaraiedl M., Mariwalla N., Ripple D., *Contribution of soot contaminated oils to wear*, SAE Technical Paper, Series 1998, 981406.
- [5] Green D.A., Lewis R., Dwyer-Joyce R.S., *Wear of valve train components due to soot contaminated lubricant*, SAE Technical Paper, Series, 2001-01-1098.
- [6] Iwabuchi A., Seto T., Shimizu T., *Evidence of abrasion of soot for diesel engine*, Proceedings of the Tribology Conference Nagasaki 2000, 1993-1998.
- [7] Jordan W., Mruk A., *Effect of soot in diesel oil on the life of friction pairs*, International Tribology Conference Kobe 2005, Japanese Society of Tribologists, 283.
- [8] Kuo C.C., Passut C.A., Jao T., *Wear mechanism in Cummins M-11 high soot diesel test engines*, SAE Technical Paper, Series 1998, 98 1372.
- [9] Mainwaring R., *Soot and wear in heavy duty diesel engines*, SAE Technical Paper, Series 1997, 971631.

- [10] Merkiś J., *Ekologiczne problemy silników spalinowych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.
- [11] Płaza S., Margielewski L., *The adsorption of the zinc diisobutyldithiophosphates and bis(diisobutoxyphosphinothioyl) disulfide on carbon black from n-hexadecane solutions*, Tribology Transactions, 36, 1993, 207-212.
- [12] Płaza S., Margielewski L., Celichowski G., *Wstęp do tribologii i tribochemia*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2005.
- [13] Rounds F.G., *Carbon: Cause of diesel engine wear?*, SAE Transactions 1978, 770829, 2870-2881.
- [14] Rounds F.G., *Soot from used diesel engines oils – their effects on wear as measured in 4-balwear tests*, SAE Technical Paper, Series 1981, 81 0499.
- [15] Rounds F.G., *The generation of synthetic diesel engine oil soots for wear studies*, Lub. Eng. 40, 1984, 394-401.
- [16] Ryason P.R., Chan I.Y., Gilmore J.T., *Polishing wear by soot*, Wear, 137, 1990, 15-24.
- [17] Sato H., Tokuoka N., *Study on wear mechanism by soot contaminated in engine oil, (Relation between characteristics of used oil and wear)*, SAE Technical Paper, Series 1999, 1999-01-3573.
- [18] Sasaki M., Kishi Y., Hyuga T., Okazaki K., Tanaka M., Kurihara I., *The effect of EGR on diesel engine oil, and its countermeasures*, SAE Technical Paper, Series 1997, 97 1695.
- [19] Szczerek M., Wiśniewski M., *Tribologia i tribotechnika*, ITE, Radom 2000.