



Ocena właściwości tribologicznych wybranych substancji smarujących na podstawie charakterystyk Herseya–Stribecka

ARKADIUSZ ARANOWSKI, TADEUSZ KAŁDOŃSKI,
KRZYSZTOF GOCMAN, TOMASZ JAN KAŁDOŃSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Instytut Pojazdów Mechanicznych
i Transportu, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, tomasz.kaldonski@wat.edu.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących właściwości tribologicznych — na podstawie charakterystyk Herseya–Stribecka, substancji smarujących takich jak syntetyczna baza olejowa PAO-6, olej perfluoropolieterowy PFPE Fomblin Y 04 oraz ciecz jonowa CJ 006, tj. bis(trifluorometylosulfonylo)imid-3-metylo-1-propylopirydynowy. Badanie przeprowadzono w Zakładzie Tribologii, Inżynierii Powierzchni i Logistyki Płynów Eksploatacyjnych Wydziału Mechanicznego Wojskowej Akademii Technicznej na uniwersalnym nano/mikrotesterze UNMT, wyprodukowanym przez CETR (Centrum for Tribology) w USA. Badania zostały zrealizowane przy różnych obciążeniach, a mianowicie 0,25 N, 5 N i 50 N. Zróżnicowały one substancje smarujące pod względem właściwości tribologicznych, ukazując wpływ zmiany prędkości tarcia oraz obciążenia węzła tarcia na wartość współczynnika tarcia. Najlepsze właściwości tribologiczne, szczególnie przy większych obciążeniach, wykazała ciecz jonowa.

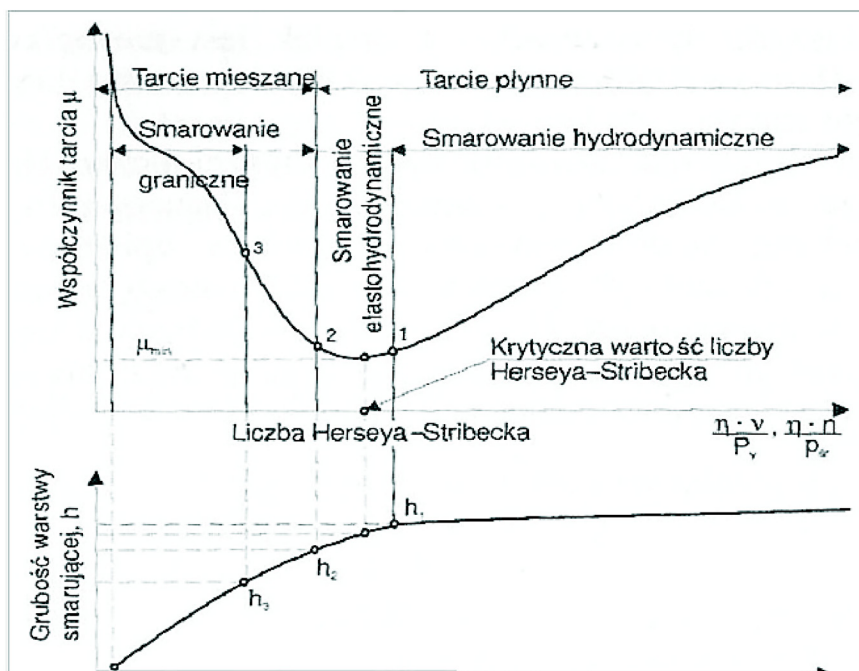
Słowa kluczowe: tribologia, współczynnik tarcia, charakterystyki Herseya–Stribecka.

DOI: 10.5604/01.3001.0013.3007

1. Wstęp

Charakterystyki Herseya–Stribecka obrazują zależność współczynnika tarcia od liczby Herseya–Stribecka (H-S) (rys. 1). Liczba H-S jest stosunkiem iloczynu lepkości dynamicznej (η – [N·m⁻²·s]) danej cieczy i prędkości poślizgu (n – [s⁻¹] lub v – [m·s⁻¹]) elementów trących do obciążenia (nacisków jednostkowych p_{sr} [N·m⁻²] lub P_y [N·m⁻¹]). Zatem jest to parametr bezwymiarowy. Każda ciecz smarująca charakteryzuje się odmiennymi właściwościami tribologicznymi, które są zdeterminowane przede

wszystkim smarnością. Charakterystyki Herseya–Stribecka pozwalają na bezpośrednią ocenę współczynnika tarcia oraz wpływu lepkości dynamicznej, prędkości tarcia lub wartości obciążenia węzła tarcia na ten współczynnik. Można je wykorzystać także do porównywania dwóch lub więcej rodzajów środków smarnych. Ocena właściwości smarnych olejów i innych substancji, które mogą być użyte do smarowania węzłów tribologicznych, jest niezwykle istotnym zagadnieniem. Konieczne jest ich wartościowanie pod względem właściwości tribologicznych w celu doboru jak najlepszej substancji smarnej, optymalnej dla konkretnego skojarzenia trącego [1]. Przedstawiona na rysunku 1 modelowa charakterystyka obejmuje całościowe (teoretyczne) ujęcie problemu. W rzeczywistych warunkach badań jest to trudne ze względu na dużą liczbę niewiadomych — szczególnie w obszarze tarcia granicznego i mieszanego. W przypadku oceny zmian współczynnika tarcia w funkcji liczby Herseya–Stribecka w obecności cieczy o określonej lepkości zależność ta jest zdeterminowana wartościami obciążenia i prędkości poślizgu. W takim przypadku charakterystyka H-S dotyczy raczej lewej i środkowej części wykresu przedstawionego na rysunku 1. Na tym modelowym wykresie zaznaczono krytyczną wartość liczby H-S, która odpowiada minimalnej wartości współczynnika tarcia, ułożonej pomiędzy umownymi punktami 1 i 2 określającymi obszar smarowania elastohydrodynamicznego.



Rys. 1. Modelowa charakterystyka Herseya–Stribecka oraz zależność grubości warstwy smarującej od liczby H-S [1]

Na prawo od punktu 1 jest strefa smarowania hydrodynamicznego, gdzie przyrost współczynnika tarcia może być oznaką np. zbyt dużej lepkości substancji smarującej szybkoobrotowy węzeł tribologiczny przy stosunkowo małym obciążeniu. Na lewo od punktu 2 jest obszar smarowania przy tarciu mieszanym i granicznym (od punktu umownego 3). W tym obszarze spadek wartości liczby H-S i równoczesny wzrost współczynnika tarcia może być spowodowany zmniejszeniem lepkości cieczy smarującej lub/i zmniejszeniem prędkości względnej elementów węzła tribologicznego, lub też zwiększeniem obciążenia węzła.

2. Cel, zakres i metodyka badań

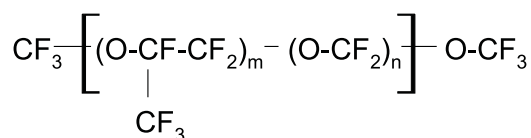
2.1. Cel badań

Celem badań było dokonanie porównawczej oceny właściwości tribologicznych wybranych smarów na podstawie przebiegu charakterystyk Herseya–Stribecka, które uzyskano, wykorzystując uniwersalny nano/mikrotribotester (UNMT-CETR, USA) wyposażony w odpowiednie oprogramowanie.

2.2. Obiekty badań

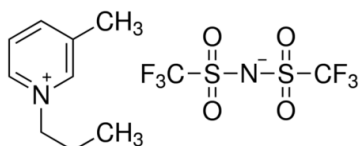
Obiektami badań były trzy substancje smarujące należące do różnych grup związków chemicznych, ale o zbliżonej lepkości dynamicznej, co ogranicza częściowo wpływ tej wielkości na uzyskane wyniki badań, w tym przebieg krzywej H-S dla zmienianych wartości obciążenia i prędkości poślizgu. Właściwości fizykochemiczne tych cieczy zostały ocenione wcześniej w ramach badań zrealizowanych w Zakładzie Tribologii, Inżynierii Powierzchni i Logistyki Płynów Eksploatacyjnych Wydziału Mechanicznego WAT [2, 3]:

- olej PFPE Fomblin Y 04 — syntetyczny olej perfluoropolieteryowy o rozgałęzionej budowie molekularnej, gęstości (w temp. 25°C) $\rho = 1,868 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, masie cząsteczkowej $m_{cz} = 1500 \text{ amu}$, temperaturze płynięcia $T_{pl} = -54^\circ\text{C}$ oraz lepkości dynamicznej (w temp. 25°C) $\eta \approx 60,04 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ i indeksie lepkości $VI = 56$. Ogólny wzór strukturalny takiego perfluoropolietery jest następujący:

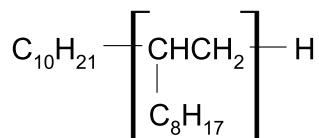


gdzie: $m + n = 8 \div 45$; $m/n = 20 \div 1000$;

- ciecz jonowa CJ 006 — bis(trifluorometylosulfonyl)imid 3-metylo-1-propylo pirydynowy, o masie cząsteczkowej $m_{cz} = 419,36$ amu, lepkości dynamicznej (w temp. 25°C) $\eta \approx 51,53$ mPa·s oraz indeksie lepkości $VI = 138$, gęstości (w temp. 25°C) $\rho = 1,43$ g·cm⁻³ i temperaturze topnienia $T_p = 0^\circ\text{C}$. Ogólny wzór chemiczny substancji jest następujący: C₁₁H₁₄F₆N₂O₄S₂, a wzory strukturalne anionu i kationu przedstawiono poniżej [3]:



- baza olejowa PAO-6 — polialfaolefiny wytwarzane w procesach polimeryzacji, znajdujące zastosowanie jako bazowe oleje do komponowania półsyntetycznych i syntetycznych olejów silnikowych oraz wysokiej klasy olejów przemysłowych. Gęstość PAO-6 (w 25°C) to $\rho \approx 0,816$ g·cm⁻³, lepkość dynamiczna (w 25°C) $\eta \approx 47,36$ mPa·s oraz indeks lepkości $VI = 144$. Wzór strukturalny polialfaolefin może być przedstawiony w sposób następujący:



co może stanowić $m_{cz} = 422$ amu [15].

Wszystkie ciecze wybrane do oceny tribologicznej na podstawie charakterystyk H-S mają bardzo zróżnicowaną budowę i skład chemiczny, ale ich lepkość jest tego samego rzędu.

2.3. Metodyka badawcza

Przed badaniami tribologicznymi, w celu pełnego scharakteryzowania badanych cieczy, ocenione były również ich podstawowe właściwości fizyczne i chemiczne istotne dla substancji stosowanych jako smary [2, 3]. Niektóre z nich podano w krótkiej prezentacji obiektów badań w poprzednim punkcie. Określono ich gęstość oraz lepkość w temperaturach 25°C, 40°C i 100°C; obliczono indeksy lepkości VI (ang. *viscosity index*), skontrolowano temperaturę płynięcia (T_p). Gęstość cieczy (ρ) zbadano, stosując tensjometr KSV Sigma 701 (produkcji fińskiej), który oprócz oceny napięcia powierzchniowego cieczy (σ) umożliwia również pomiar gęstości

cieczy — zresztą koniecznej do zaprogramowania zautomatyzowanego pomiaru napięcia międzyfazowego tym przyrządem. Dołączone do tensjometru oprogramowanie pozwala na jego łatwą obsługę według instrukcji [5], za pomocą komputera.

Obliczanie indeksu lepkościowego (VI) przeprowadzono według wskazań polskiej normy PN-ISO 2909: 2009 [6]. Narzuca ona sposób oznaczania lepkości kinematycznej w 40°C i 100°C (potrzebnych do obliczenia indeksu lepkościowego VI) według normy PN-EN ISO 3104: 2004 [7], tj. stosując kapilarny wiskozymetr Pinkiewicza.

Sposób oznaczania temperatury płynięcia produktów naftowych (w tym cieczy smarujących) jest określony normą PN ISO 3016: 2005 [8]. Ocenę temperatury płynięcia badanych cieczy smarujących przeprowadzono całkowicie zautomatyzowanym urządzeniem ISL-CPP97-2 (fr. *Instrumentation Scientifique de Laboratoire-Cloud, Pour Point 97-2*) [9]. Co do zasady oznaczenie temperatury płynięcia polega na oziębieniu badanego oleju w specjalnej próbówce i obserwowaniu co każde 3°C jego ruchliwości. Najniższą temperaturę, w której obserwuje się jeszcze ruchliwość badanego oleju, po przechyleniu próbówki pod kątem 45° do poziomu na okres 5 s, określa się jako temperaturę płynięcia.

W omawianym przypadku badano także napięcie powierzchniowe cieczy smarujących, jako jedną z istotnych właściwości, która ma wpływ na ich zwilżalność oraz smarność (ang. *lubricity*). Ciecze o bardzo dużym napięciu powierzchniowym, tzn. o dużej sile kohezji zwiększającej tendencję do zmniejszania granicy faz (np. powierzchni styku ze smarowaną powierzchnią ciała stałego), mogą mieć gorsze właściwości zwilżania materiału podłoża, a to z kolei może pogorszyć proces adsorpcji molekuł substancji smarującej na podłożu, a także być jedną z przyczyn przerwania filmu granicznego cieczy smarującej. Z drugiej strony małe napięcie cieczy smarującej, czyli dobra zwilżalność, jest efektem bardzo małych sił kohezji w cieczy smarującej, co może prowadzić do małej odporności filmu smarującego na obciążenia zewnętrzne [2, 3, 10].

W tych badaniach do oceny napięcia powierzchniowego i kąta zwilżania cieczy smarujących zastosowano wspomniany wcześniej tensjometr KSV Sigma 701 (prod. fińskiej). Pomiar napięcia powierzchniowego tym przyrządem opiera się na pomiarze siły działającej między zgłębnikiem (w danym przypadku była to płytką Wilhelmy'ego) a granicą faz dwóch płynów, tzn. badanej cieczy i powietrza. Siły działające między zgłębnikiem a powierzchnią płynu są automatycznie użyte przez aparat KSV Sigma 701 do obliczenia napięcia powierzchniowego (σ) badanej cieczy. W przyrządzie KSV Sigma 701 zgłębnikiem była platynowa płytką Wilhelmy'ego o wymiarach: grubość = 0,1 mm \times szerokość = 19,6 mm, zatem obwód zwilżany wynosił $L = 2 \times 19,6 + 2 \times 0,1 = 39,4$ mm. Oprogramowanie tensjometru pozwalało na bezpośrednią rejestrację i obserwację maksymalnej siły potrzebnej do oderwania płytki od cieczy i wyliczonej wartości napięcia powierzchniowego badanych cieczy. Po wyznaczeniu napięcia powierzchniowego cieczy można było przystąpić do oceny kąta zwilżania na tym samym aparacie, stosując tę samą płytką Wilhelmy'ego i te

same parametry wejściowe pomiaru. W momencie zanurzania płytki w badanej cieczy siły działające na wagę zostają zapisane przez program i są wyrażane wzorem:

$$F = G_p + \sigma \cdot L \cdot \cos\theta - W_h, \quad (1)$$

gdzie: G_p — ciężar płytki rejestrowany przed jej zetknięciem z powierzchnią cieczy [N];
 σ — napięcie powierzchniowe [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$];
 L — obwód płytki (zwilżana długość) [m];
 W_h — siła wyporu hydrostatycznego cieczy [N];
 $\cos\theta$ — cosinus kąta zwilżania.

Aparat KSV Sigma 701 taruje wagę zgłębnika (G_p) i usuwa wpływ siły hydrostatycznego wyporu cieczy (W_h). Pozostała składowa siły opisanej wzorem (2) jest siłą zwilżania płytki Wilhelmy'ego:

$$F_{\text{zwilż}} = \sigma \cdot L \cdot \cos\theta. \quad (2)$$

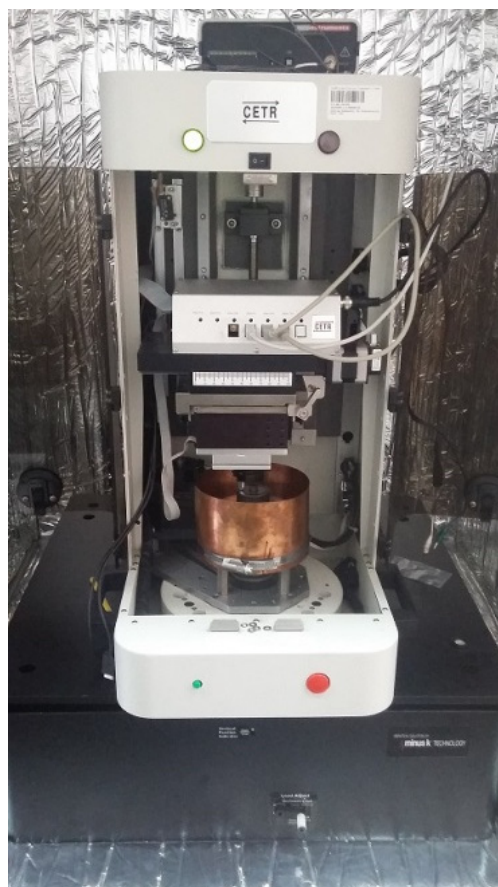
Podczas zanurzania płytki Wilhelmy'ego z wygenerowanych danych uzyskiwany był postępowy kąt zwilżania (ang. *advancing contact angle*), natomiast podczas wynurzenia — zstępujący kąt zwilżania (ang. *receding contact angle*). W zrealizowanych badaniach do analizy porównawczej korzystano z maksymalnej wartości postępowego kąta zwilżania. Zgodnie z mechanizmem procesu i opisem zawartym w instrukcji użytkownika KSV Sigma 701 [5], wartość tę można traktować jako wartość statycznego kąta zwilżania wzorcowej płytki platynowej (pierwotnie suchej) przez badaną ciecz.

Przed rozpoczęciem każdego kolejnego pomiaru należało fizycznie przygotować układ aparatu oraz jego oprogramowanie. Naczynko na badaną ciecz myto benzyną ekstrakcyjną i acetonem, a następnie suszono, a platynową płytkę dodatkowo opalano palnikiem gazowym w płomieniu o temperaturze $\sim 600^\circ\text{C}$. Ponadto przed każdym pomiarem, po osiągnięciu żądanej temperatury cieczy, „odświeżano” powierzchnię międzyfazową, odsysając „starą” fazę gazową znad lustra badanej cieczy — wzorując się na wskazaniach zawartych w renomowanej literaturze [11÷13].

Do realizacji badań mających na celu uzyskanie charakterystyk Herseya–Stribecka dla wybranych substancji smarujących (p. 2.2) posłużył uniwersalny nano/mikrotribotester (UNMT-CETR, USA) wraz z oprogramowaniem komputerowym. Jest to urządzenie uniwersalne, ponieważ za jego pomocą można wykonać wiele różnych badań tribologicznych takich jak np. [4]:

- badania twardości i mikrotwardości,
- badania przyczepności powłok,
- badania tarciove typu trzpień (kula)-tarcza,
- „Stribeck test”,
- profilografowanie powierzchni.

Jest to możliwe dzięki zastosowaniu wymiennych elementów osprzętu takich jak uchwyty, czujniki, próbki, napędy czy ostrza. Na rysunku 2 został zaprezentowany widok ogólny urządzenia UNMT. Napędy, czujniki siły i uchwyty będące na wyposażeniu zestawu pozwalają na wykonywanie pomiarów mikro- i makrotwardości (met. Vickersa, Rockwella oraz metodą instrumentalną), a także mikro- i makroscratch testów w szerokim zakresie obciążeń ($1 \mu\text{N} \div 200 \text{ N}$). Wyposażenie zestawu pozwala również na wykonywanie testów tribologicznych we wspomnianym zakresie obciążeń w ruchu obrotowym ($0,1 \div 1000 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$) oraz posuwisto-zwrotnym (skok: $0,1 \div 25 \text{ mm}$; częstotliwość: $0,1 \div 25 \text{ Hz}$). Zestaw oprzyrządowany jest w kilka dodatkowych czujników takich jak: dokładny pojemnościowy czujnik przemieszczenia pozwalający na pomiary z rozdzielczością 50 nm (zakres do $250 \mu\text{m}$), czujnik emisji akustycznej ($0,2 \div 5,2 \text{ MHz}$), czujnik oporu elektrycznego ($1 \div 100 \text{ k}\Omega$) oraz czujniki temperatury ($0 \div 100^\circ\text{C}$) i wilgotności powietrza ($0 \div 100 \%$) [4].



Rys. 2. Widok ogólny urządzenia UNMT na platformie antywibracyjnej

Otrzymanie charakterystyk Herseya–Stribecka było możliwe dzięki zastosowaniu metody kula-tarcza (ang. *ball-on-disc*). Do badań tarciovych zostały użyte kulki ze stali łożyskowej (100 Cr 6) o średnicy 1/8" oraz próbki (rys. 3) ze stali narzędziowej (145 Cr 6). Każda z próbek doprowadzona była do takiej samej chropowatości powierzchni ($R_a = 0,05 \mu\text{m} \pm 0,008$) w celu wyeliminowania wpływu tego parametru na wyniki badań. Pomiarów chropowatości dokonywano na urządzeniu Hommel Tester T 1000 (rys. 4).



Rys. 3. Próbkki ze stali narzędziowej 145 Cr 6



Rys. 4. Hommel Tester T 1000 służący do pomiaru chropowatości próbek

Proces tarcia przebiegał w styku skoncentrowanym, smarowanym badaną substancją smarującą i był realizowany w dwudziestu jeden etapach poprzedzonych docieraniem. Każdą substancję zbadano dwukrotnie przy obciążeniach 0,25 N, 5 N oraz 50 N [14].

Przebieg testu był następujący:

I. Docieranie:

1. Osiągnięcie ustalonego obciążenia;
2. Tarcie z prędkością obrotową próbki $25 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ przez 60 min ze zmianą kierunku obrotu co 50 obrotów;
3. 15 sekund przerwy;
4. Tarcie z prędkością obrotową próbki $150 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ przez 15 min ze zmianą kierunku obrotu co 75 obrotów;
5. 15 sekund przerwy.

II. Test właściwy:

1. $600 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ przez 2 minuty ze zmianą kierunku co 60 obrotów;
2. $500 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ przez 2 minuty ze zmianą kierunku co 50 obrotów;
3. $400 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ przez 2 minuty ze zmianą kierunku co 40 obrotów;
4. $350 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ przez 2 minuty ze zmianą kierunku co 35 obrotów;
5. $300 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ przez 2 minuty ze zmianą kierunku co 30 obrotów;
6. $250 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ przez 2 minuty ze zmianą kierunku co 25 obrotów;
7. $200 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ przez 2 minuty ze zmianą kierunku co 20 obrotów;
8. $150 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ przez 2 minuty ze zmianą kierunku co 15 obrotów;
9. $130 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ przez 2 minuty ze zmianą kierunku co 13 obrotów;
10. $100 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ przez 2 minuty ze zmianą kierunku co 10 obrotów;
11. $70 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ przez 2 minuty ze zmianą kierunku co 7 obrotów;
12. $50 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ przez 2 minuty ze zmianą kierunku co 5 obrotów;
13. $30 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ przez 2 minuty ze zmianą kierunku co 3 obroty;
14. $20 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ przez 2 minuty ze zmianą kierunku co 2 obroty;
15. $10 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ przez 2 minuty ze zmianą kierunku co 1 obrót;
16. $5 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ przez 2 minuty ze zmianą kierunku co 0,5 obrotu;
17. $2 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ przez 2 minuty ze zmianą kierunku co 0,2 obrotu;
18. $1 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ przez 2 minuty ze zmianą kierunku co 0,1 obrotu;
19. $0,5 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ przez 2 minuty ze zmianą kierunku co 0,05 obrotu;
20. $0,3 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ przez 2 minuty ze zmianą kierunku co 0,03 obrotu;
21. $0,2 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ przez 2 minuty ze zmianą kierunku co 0,02 obrotu.

Taki przebieg testów jest wynikiem przeprowadzonych wcześniej wielu badań wstępnych z różnymi cieczami smarującymi, w oparciu o zalecenia producenta zestawu UNMT. Przyjęte wartości prędkości obrotowych pokrywają prawie całkowicie zakres parametrów pracy silnika aparatu ($0,1 \div 1000 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$). Ustalone wartości prędkości obrotowej $0,2 \div 600 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ odpowiadają prędkościom liniowym

w badanym styku z zakresu $0,0003 \div 0,94 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Natomiast dla prędkości obrotowej powyżej $600 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ nie stwierdzono istotnych zmian współczynnika tarcia. Ponadto obserwowano spore ubytki środka smarnego pomiędzy elementami par trącej spowodowane dużą prędkością.

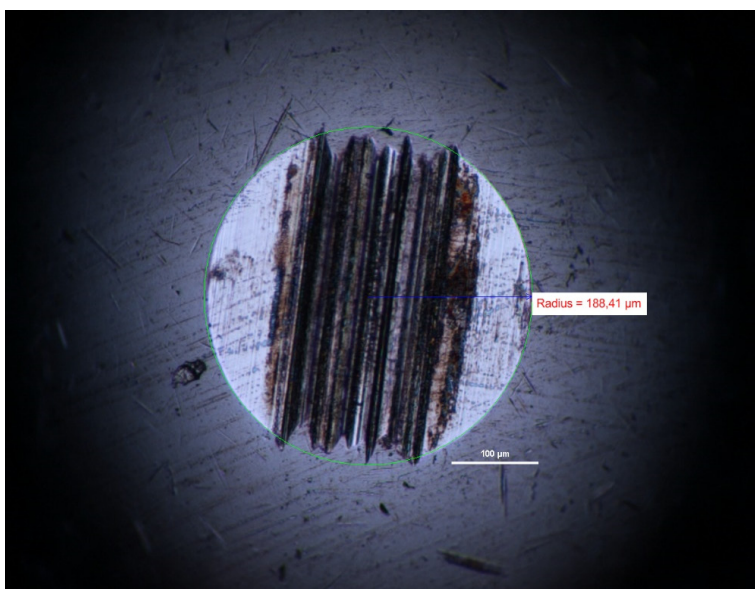
Natomiast zmniejszenie kroku pomiędzy kolejnymi coraz mniejszymi wartościami prędkości obrotowej w teście miało na celu zagęszczenie punktów pomiarowych w miejscach największych zmian wartości współczynnika tarcia, tj. w punktach na krzywej H-S, gdzie widoczne są zmiany smarowania hydrodynamicznego w elasto-hydrodynamiczne, a następnie w graniczne. W każdym kroku testu właściwego stosowano czas biegu 2 minuty, ponieważ w wielu próbach stwierdzono, że jest to wystarczający czas do ustabilizowania się wartości współczynnika tarcia dla zadanych parametrów eksperymentu. Liczbę obrotów, po której następowała zmiana kierunku ruchu, dobrano tak, aby zmiana ta następowała za każdym razem po tym samym czasie, niezależnie od prędkości (co 6 sekund).

Jedno badanie trwało łącznie 118 minut. W czasie tarcia (21 pkt pomiarowych) rejestrowana była siła tarcia oraz obciążenie — ich iloraz pozwolił na obliczenie współczynnika tarcia niezbędnego do wykreślenia charakterystyk Herseya–Stribecka. Dla każdego testu każdorazowo wymieniane były próbki oraz kulki testowe, a przed zamontowaniem na UNMT dokładnie przemywane acetonem i wycierane ligniną. Dla wszystkich testów odmierzana była jednakowa ilość substancji smarującej (0,5 ml, przy pomocy strzykawki z naniesioną skalą do 2 ml), a następnie równomiernie rozprowadzona po powierzchni próbki przed rozpoczęciem docierania. Tarcie realizowane było na promieniu jednakowym dla każdej próbki, wynoszącym 15 mm. Znajomość ustalonego promienia tarcia pozwoliła na wyliczenie niezbędnej prędkości poślizgu. Oprogramowanie UNMT umożliwiło eksport wyników badań do programu MS Excel, a następnie wykreślenie charakterystyk H-S dla poszczególnych substancji, przy znanej wartości lepkości dynamicznej, obciążenia oraz prędkości poślizgu. Na koniec każdego badania dokonano pomiaru śladu wytarcia na kulce testowej za pomocą mikroskopu optycznego Nikon ECLIPSE LV 100 (rys. 5). Mikroskop wyposażony był w komputerowy analizator obrazu NIS-AR oraz stolik skanujący w osi X, Y i Z.

Na rysunku 6 pokazano okno oprogramowania mikroskopu podczas wyznaczania średnicy śladu zużycia.



Rys. 5. Mikroskop optyczny Nikon ECLIPSE LV 100 wraz z osprzętem komputerowym



Rys. 6. Okno oprogramowania mikroskopu Nikon ECLIPSE LV 100 podczas wyznaczania średnicy śladu zużycia kulki testowej

3. Wyniki badań tribologicznych oraz ich analiza

3.1. Wyniki oceny właściwości fizykochemicznych wybranych cieczy

W tabeli 1 zebrano wyniki oceny podstawowych właściwości fizykochemicznych cieczy smarujących przeznaczonych następnie do badań tribologicznych na urządzeniu UNMT. Przedstawione w tabeli 1 wartości są średnimi z co najmniej sześciu pomiarów (w przypadku lepkości i temperatury płynięcia) oraz dziesięciu powtórzeń w pozostałych pomiarach [2, 3, 10].

TABELA 1.

Podstawowe właściwości fizykochemiczne obiektów badań

Ciecz smarująca		PFPE Fomblin Y 04 $M_{cz} = 1\ 500$ amu		Ciecz jonowa CJ 006 $M_{cz} = 419,36$ amu		Olej bazowy PAO-6 $M_{cz} \approx 422$ amu	
Właściwość	Temp. Pomiaru [°C]	Wartość	Odchylenie standardowe δ	Wartość	Odchylenie standardowe δ	Wartość	Odchylenie standardowe δ
Gęstość ρ [g·cm ⁻³]	25	1,868	0,0010	1,447	0,0000	0,816	0,0012
	40	1,827	0,0017	1,430	0,0010	0,806	0,0019
	100	1,711	0,0005	1,375	0,0010	0,769	0,0006
Lepkość dynamiczna η [mPa·s]	25	60,04	0,28	51,03	0,26	47,36	0,24
	40	32,25	0,15	29,40	0,12	24,52	0,15
	100	5,99	0,07	6,23	0,04	4,56	0,17
Lepkość kinematyczna ν [mm ² ·s ⁻¹]	25	32,14	0,15	33,61	0,18	58,05	0,23
	40	17,65	0,08	20,56	0,08	30,42	0,13
	100	3,50	0,04	4,53	0,03	5,93	0,07
Index lepkości VI [-]	----	56	----	138	----	144	----
Napięcie powierzchniowe σ [mN·m ⁻¹]	25	16,880	0,076	32,993	0,042	27,523	0,070
	40	15,239	0,058	32,510	0,051	26,846	0,063
	100	11,115	0,045	29,681	0,078	23,869	0,040
Kąt zwilżania Θ_{max} [°]	25	0,000	----	25,90	----	34,78	----
	40	0,000	----	23,07	----	31,88	----
	100	0,000	----	7,69	----	20,88	----
Kosinus kąta zwilżania $\cos \Theta_{max}$	25	1,000	----	0,890	----	0,821	----
	40	1,000	----	0,920	----	0,848	----
	100	1,000	----	0,991	----	0,935	----

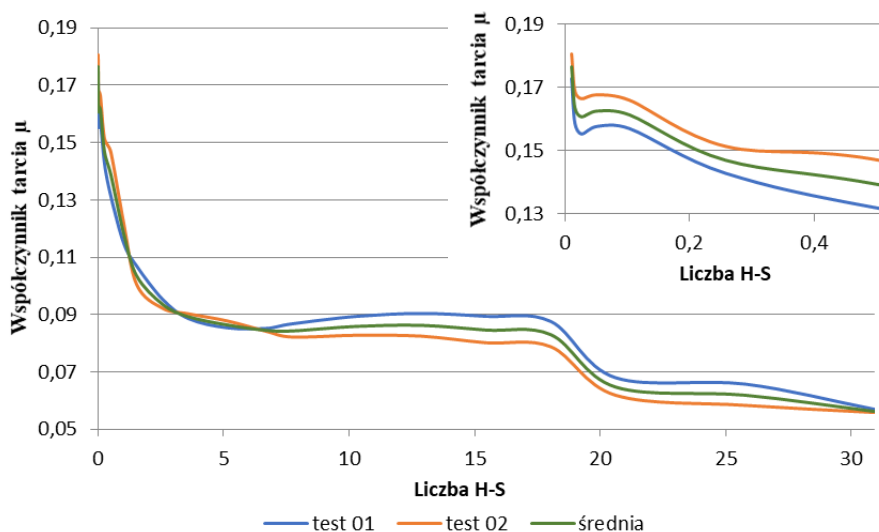
Przegląd zebranych w tabeli 1 wyników pozwala zauważyć, że oprócz niewątpliwie bardzo różnego składu chemicznego i zróżnicowanej budowy cząsteczkowej, masa cząsteczkowa PFPE Fomblin Y 04 (1 500 amu) znacząco różni się od dwóch pozostałych cieczy (CJ 006 — 419,36 amu i PAO-6 ~ 422 amu [15]). Równocześnie gęstość PFPE Fomblin Y 04 jest największa i wynosi $\rho = 1,868$ g·cm⁻³ w temperaturze 25°C;

jest ona ponad dwukrotnie większa od gęstości PAO-6 ($0,816 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$). Gęstość CJ 006 ($1,447 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) jest również dużo większa od gęstości PAO-6. Lepkość badanych cieczy smarujących też się różniła, ale już nie tak znacząco. Wszystkie trzy cieczy można określić jako średniolepkie. Największą lepkość dynamiczną miała PFPE Fomblin Y 04 ($60,04 \text{ mPa}\cdot\text{s}$), nieco mniejszą lepkość miała ciecz jonowa CJ 006 ($51,03 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) i wreszcie najmniejszą lepkością dynamiczną odznaczał się olej bazowy PAO-6 ($47,36 \text{ mPa}\cdot\text{s}$), ale z powodu bardzo małej gęstości tego oleju w stosunku do dwóch pozostałych cieczy jego lepkość kinematyczna była największa i wynosiła $58,05 \text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$, gdy lepkość kinematyczna PFPE Fomblin Y 04 wynosiła $32,14 \text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$, a lepkość CJ 006 miała zbliżoną wartość, tj. $33,61 \text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$. Równocześnie trzeba zauważyć, że indeks lepkości VI (ang. *viscosity index*) PFPE Fomblin Y 04 był bardzo mały ($VI = 56$), niemal trzykrotnie mniejszy od dwóch pozostałych cieczy, co świadczy o jego bardzo małej odporności na zmiany lepkości w funkcji zmian temperatury (np. z powodu ciepła generowanego w procesie tarcia). Olej perfluoropolieteryowy Fomblin Y 04 odznaczał się ponadto znikomym napięciem powierzchniowym ($16,880 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$), co skutkowało jego pełną zwilżalnością (w warunkach pomiaru platynową płytką Wilhelmy'ego). Pozostałe dwie cieczy wykazały $1,5\div 2$ razy większe napięcie powierzchniowe (CJ 006 — $32,993 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ i PAO-6 — $27,523 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$), odznaczając się równocześnie bardzo dobrą zwilżalnością (CJ006 — $\cos \theta_{max} = 0,890$ i PAO-6 — $\cos \theta_{max} = 0,821$). W funkcji przyrostu temperatury (np. spowodowanej tarciami) napięcia powierzchniowe tych cieczy, zgodnie z przewidywaniem, nieznacznie malały, a ich $\cos \theta_{max}$ rosły, co świadczy o poprawie zwilżalności.

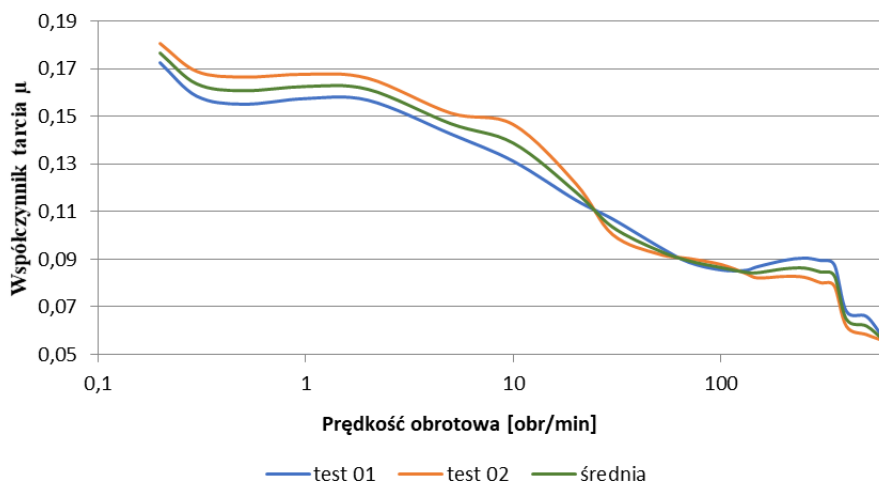
3.2. Wyniki badań przeprowadzonych pod obciążeniem 0,25 N

3.2.1. Ciecz jonowa CJ 006

Ciecz jonową CJ 006 zbadano nie tylko pod obciążeniem 0,25 N, lecz także pod innymi obciążeniami (0,5 N — rys. 16 i 50 N — rys. 25). Na rysunku 7 zaprezentowano wyniki badań CJ 006 pod obciążeniem 0,25 N w postaci charakterystyk Herseya–Stribecka. W tym przypadku liczba H-S osiągała wartość znacznie większą (liczba H-S > 30) niż dla obciążenia 5 N czy 50 N. Wynika to ze wzoru na tę liczbę ($LHS = \eta \cdot n / p_{sr}$, gdzie: η — lepkość dynamiczna [$\text{mN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}$] badanej cieczy; n — to prędkość obrotowa próbki [s^{-1}]; p_{sr} — naciski jednostkowe [$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$] w strefie tarcia przy stosowanym obciążeniu — tutaj 0,25 N). Dla każdego obciążenia test był realizowany dwukrotnie. Przebiegi charakterystyk (rys. 7) dla obu testów były bardzo podobne, a maksymalna różnica współczynnika tarcia pomiędzy nimi wynosiła $\sim 0,006$. Największa wartość współczynnika tarcia wynosiła 0,1787, a najmniejsza 0,0564. Smarowanie płynne rozpoczynało się przy liczbie H-S ~ 5 . Na rysunku 8 przedstawiona została zależność współczynnika tarcia od prędkości obrotowej próbki (w skali logarytmicznej) podczas badania CJ 006 pod obciążeniem 0,25 N.

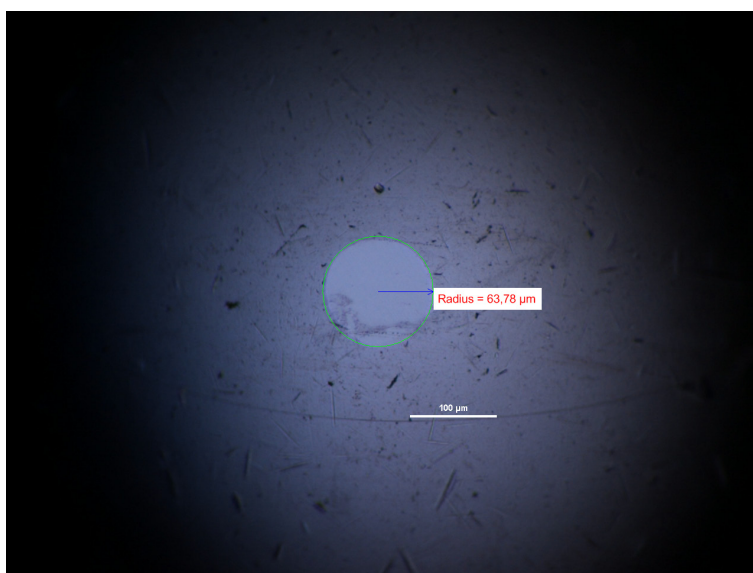


Rys. 7. Charakterystyki Herseya-Stribecka wykreślone dla CJ 006 przy badaniu pod obciążeniem 0,25 N



Rys. 8. Wykres zależności współczynnika tarcia od prędkości obrotowej próbki CJ 006 przy badaniu pod obciążeniem 0,25 N

Ślad wytarcia kulki testowej po badaniu CJ 006 pod obciążeniem 0,25 N został przedstawiony na rysunku 9. Promień śladu zużycia wynosił 63,78 μm .

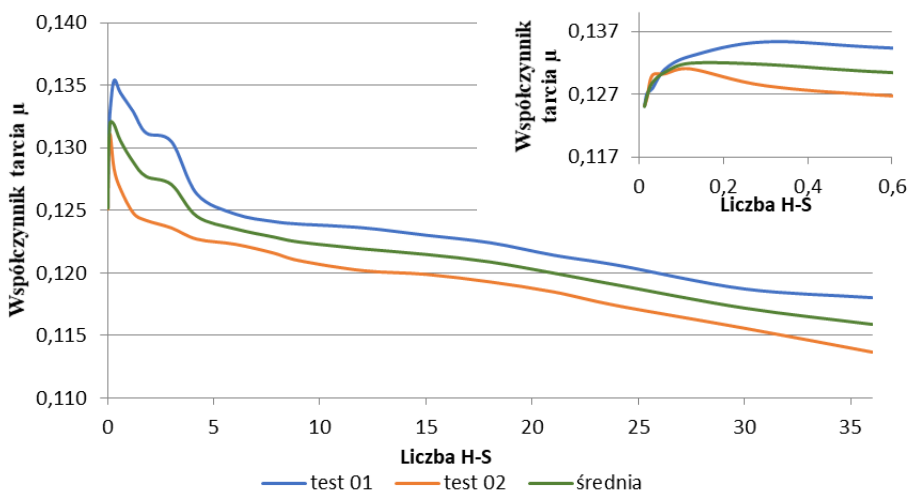


Rys. 9. Ślad wytarcia kulki testowej po badaniu CJ 006 pod obciążeniem 0,25 N

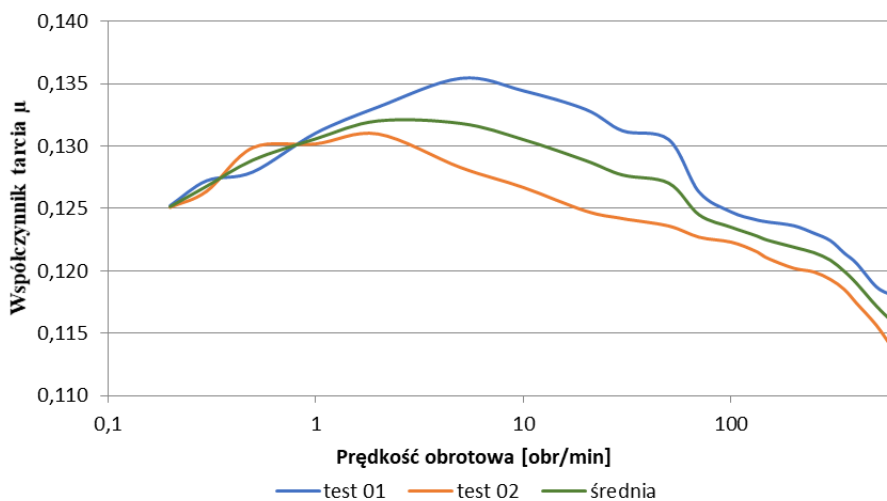
3.2.2. Ciecz perfluoropolieterowa PFPE Fomblin Y 04

Wyniki badań oleju PFPE Fomblin Y 04 pod obciążeniem 0,25 N zostały zilustrowane na rysunku 10. Rozbieżności pomiędzy przebiegami w najgorszym przypadku nie przekraczały wartości 0,01, a charakter obu przebiegów był bardzo podobny. Współczynnik tarcia osiągał największą wartość równą 0,1354 dla liczby HS $\sim 0,3$ (co odpowiada prędkości obrotowej próbki 5 obr·min⁻¹), a wartość najmniejszą dla liczby HS ≈ 36 (której odpowiada prędkość obrotowa próbki 600 obr·min⁻¹). W tym przypadku smarowanie płynne może rozpoczynać się w granicach liczby H-S $\sim 4,8$. Na rysunku 11 zostały przedstawione wyniki badań Fomblin Y 04 pod obciążeniem 0,25 N w postaci zależności współczynnika tarcia od prędkości obrotowej próbki w skali logarytmicznej.

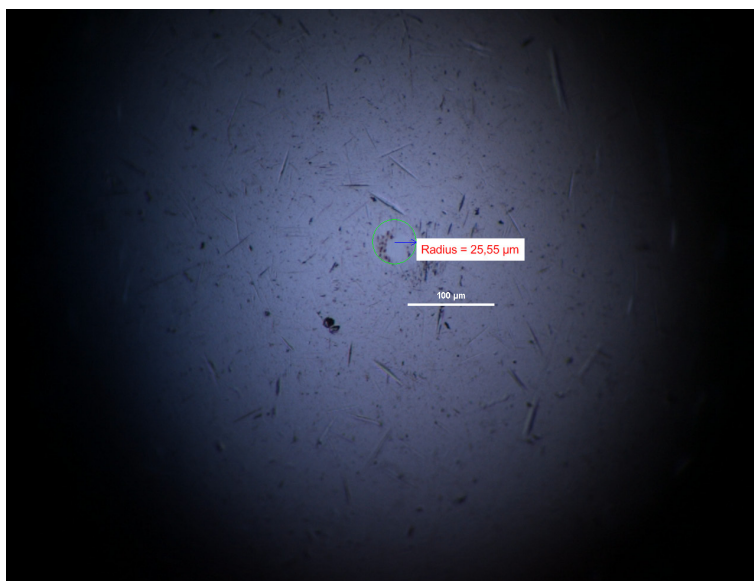
Ślad wytarcia kulki testowej po badaniu Fomblin Y 04 pod obciążeniem 0,25 N został przedstawiony na rysunku 12. Promień śladu zużycia wynosił 25,55 μm .



Rys. 10. Charakterystyki Herseya–Stribecka wykreślone dla PFPE Fomblin Y 04 przy badaniu pod obciążeniem 0,25 N



Rys. 11. Wykres zależności współczynnika tarcia od prędkości obrotowej próbki dla PFPE Fomblin Y 04 przy badaniu pod obciążeniem 0,25 N

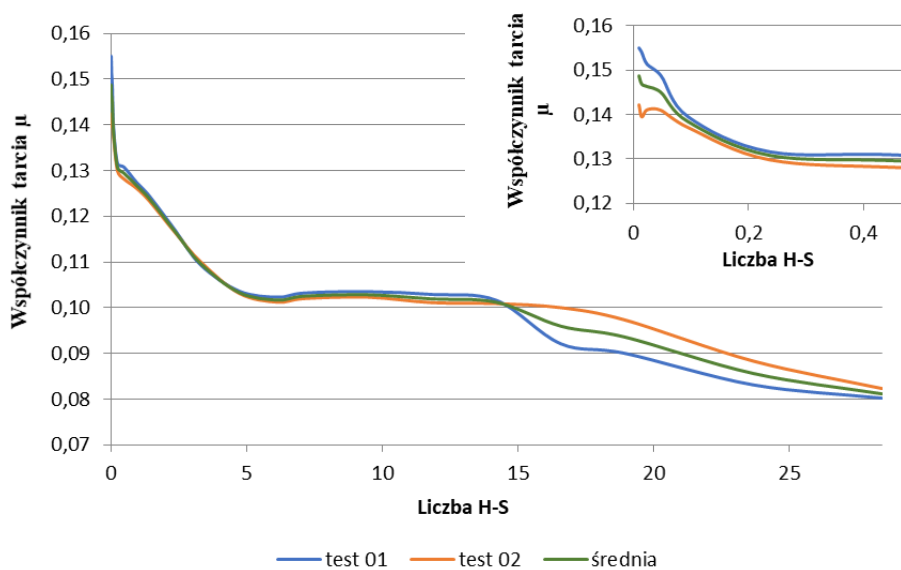


Rys. 12. Ślad wytarcia kulki testowej po badaniu PFPE Fomblin Y 04 pod obciążeniem 0,25 N

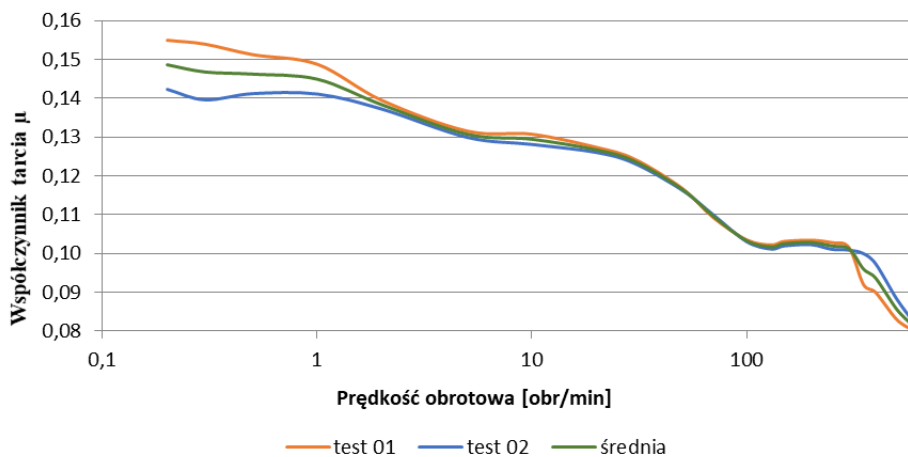
3.2.3. Olej bazowy polialfaolefinowy PAO-6

Na rysunku 13 zostały zobrazowane charakterystyki Herseya–Stribecka syntetycznej bazy olejowej PAO-6 badanej pod obciążeniem 0,25 N. Charakter przebiegu obu testów jest niemal identyczny. Potwierdza to prawidłowość wykonania testów. Widoczne różnice współczynnika tarcia są małe i zasadniczo nie przekraczają wartości 0,01. Maksymalna wartość współczynnika tarcia obserwowana była przy najniższej liczbie H-S i wynosiła 0,155. Odwrotnie jest z wartością minimalną, która wynosiła 0,0812 — widoczna przy najwyższej liczbie H-S w badanym zakresie. W opisywanym przypadku smarowanie hydrodynamiczne może rozpoczynać się przy wartości liczby HS~ 5. W celu wyraźniejszego ukazania wpływu prędkości obrotowej próbki (prędkości tarcia po przemnożeniu przez promień tarcia 15 mm) na współczynnik tarcia zależność taka została ukazana na rysunku 14 w skali logarytmicznej.

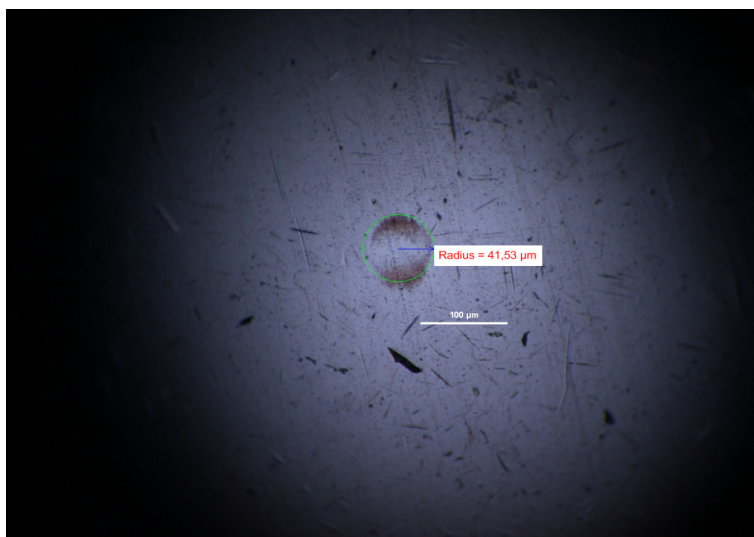
Ślad wytarcia kulki testowej po badaniu PAO-6 pod obciążeniem 0,25 N został przedstawiony na rysunku 15. Promień śladu zużycia wynosił 41,53 μm.



Rys. 13. Charakterystyki Herseya-Stribecka wykreślone dla PAO-6 przy badaniu pod obciążeniem 0,25 N



Rys. 14. Wykres zależności współczynnika tarcia od prędkości obrotowej próbki dla PAO-6 przy badaniu pod obciążeniem 0,25 N

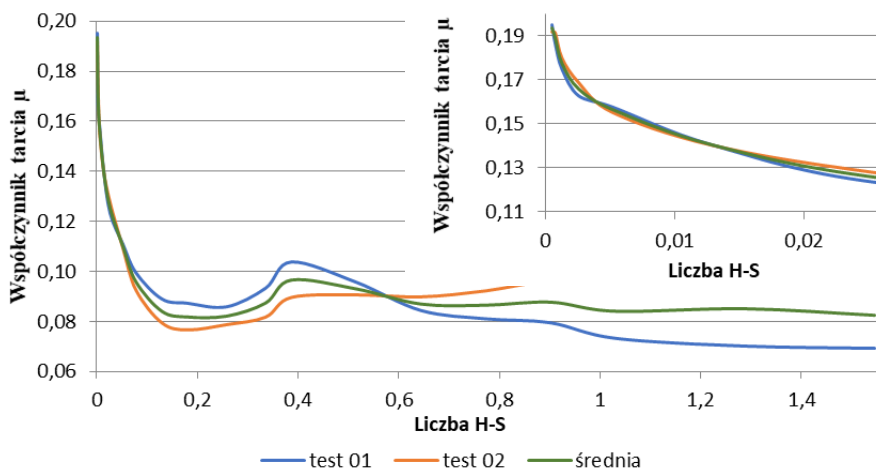


Rys. 15. Ślad wytarcia kulki testowej po badaniu PAO-6 pod obciążeniem 0,25 N

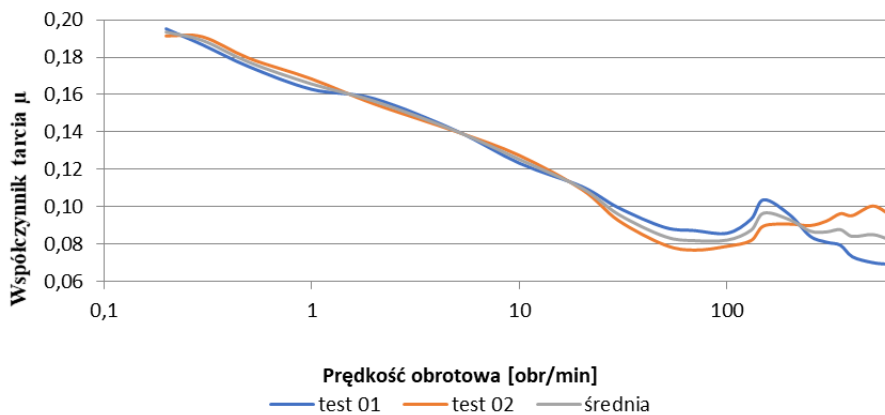
3.3. Wyniki badań przeprowadzonych pod obciążeniem 5 N

3.3.1. Ciecz jonowa CJ 006

Z rysunku 16 można odczytać wartości współczynnika tarcia dla konkretnych wartości liczby H-S przy badaniu CJ 006 pod obciążeniem 5 N. Charakter przebiegu charakterystyk wyznaczonych dla testu pierwszego i drugiego jest bardzo zbliżony. W początkowej części charakterystyki wyznaczone dla obu testów niemal się pokrywają. Dopiero przy większych prędkościach obrotowych próbki ($\sim 50 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$) wartości te zaczynają się lekko różnić (maksymalna różnica współczynnika tarcia pomiędzy testami wynosi $\sim 0,03$). Wynikać to może np. z obecności większej ilości produktów zużycia próbki w teście nr 2 niż w teście nr 1. Największa wartość współczynnika tarcia wynosiła 0,1934, a najmniejsza 0,0692. Smarowanie płynne zaczyna zachodzić dla wartości liczby H-S $\sim 0,13$.

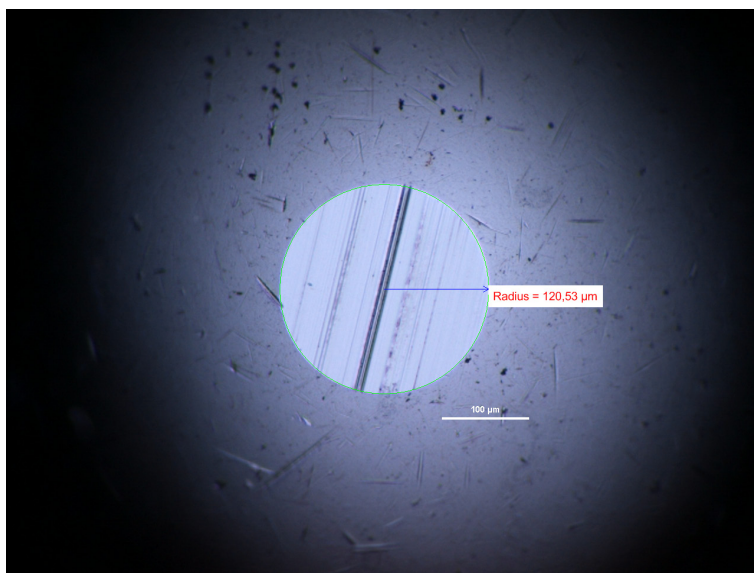


Rys. 16. Charakterystyki Herseya-Stribecka wykresione dla CJ 006 przy badaniu pod obciążeniem 5 N



Rys. 17. Wykres zależności współczynnika tarcia od prędkości obrotowej próbki CJ 006 przy badaniu pod obciążeniem 5 N

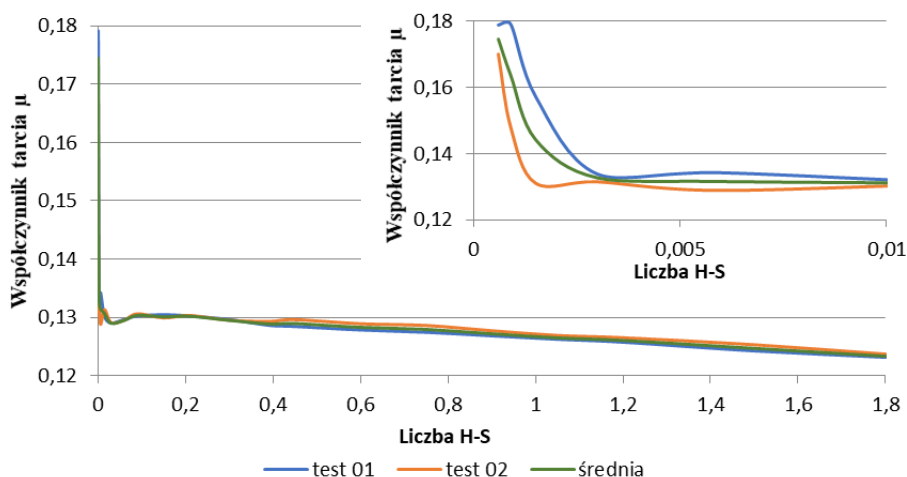
Ślad wytarcia kulki testowej po badaniu CJ 006 pod obciążeniem 5 N został przedstawiony na rysunku 18. Promień śladu zużycia wynosił 120,53 μm .



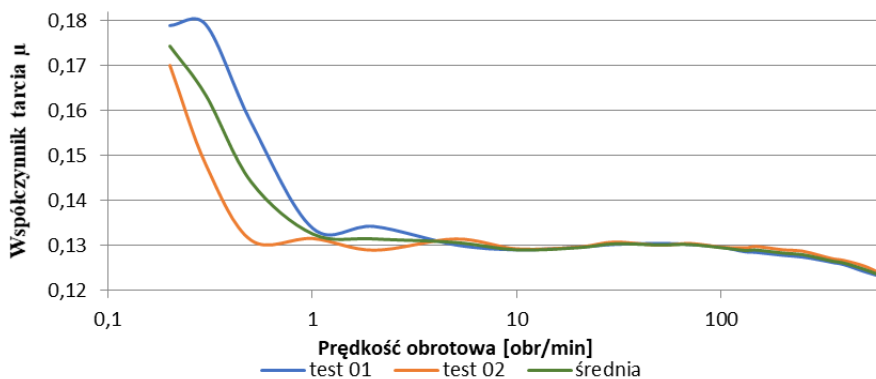
Rys. 18. Ślad wytarcia kulki testowej po badaniu CJ 006 pod obciążeniem 5 N

3.3.2. Ciecz perfluoropolieterowa PFPE Fomblin Y 04

Na rysunku 19 przedstawiono charakterystyki H-S oleju PFPE Fomblin Y 04 po badaniu pod obciążeniem 5 N. Widać wyraźnie, że oba przebiegi niemal się pokrywają. Niewielkie różnice wartości współczynnika tarcia pomiędzy przebiegami widoczne są na powiększeniu w prawym górnym rogu rysunku. Można je uznać za pomijalnie małe. Maksymalna wartość zbadanego współczynnika tarcia podczas smarowania węzła tarcia kula-tarcza (ang. *ball-on-disc*) wynosiła 0,1789. Najmniejsza wartość natomiast równa była 0,1231. Smarowanie hydrodynamiczne w opisywanym zakresie rozpoczynało się przy liczbie H-S wynoszącej $\sim 0,006$. Rysunek 20 odzwierciedla zależność współczynnika tarcia od prędkości obrotowej próbki w skali logarytmicznej. Przy obu przebiegach badawczych współczynnik tarcia zmniejsza się gwałtownie w zakresie prędkości obrotowych od 0,2 do 1 obr·min⁻¹ (spadek o $\sim 0,048$), a następnie spada łagodnie w pozostałym zakresie prędkości obrotowych (spadek o $\sim 0,012$).

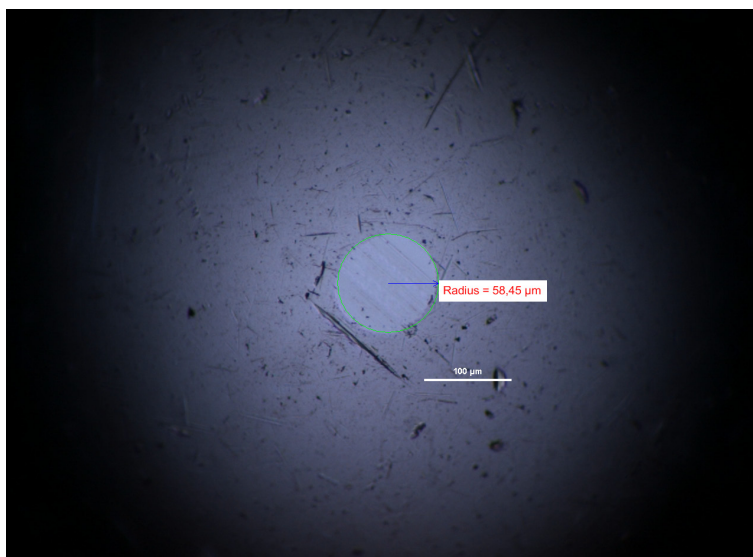


Rys. 19. Charakterystyki Herseya-Stribecka wykreślone dla PFPE Fomblin Y 04 przy badaniu pod obciążeniem 5 N



Rys. 20. Wykres zależności współczynnika tarcia od prędkości obrotowej próbki dla PFPE Fomblin Y 04 przy badaniu pod obciążeniem 5 N

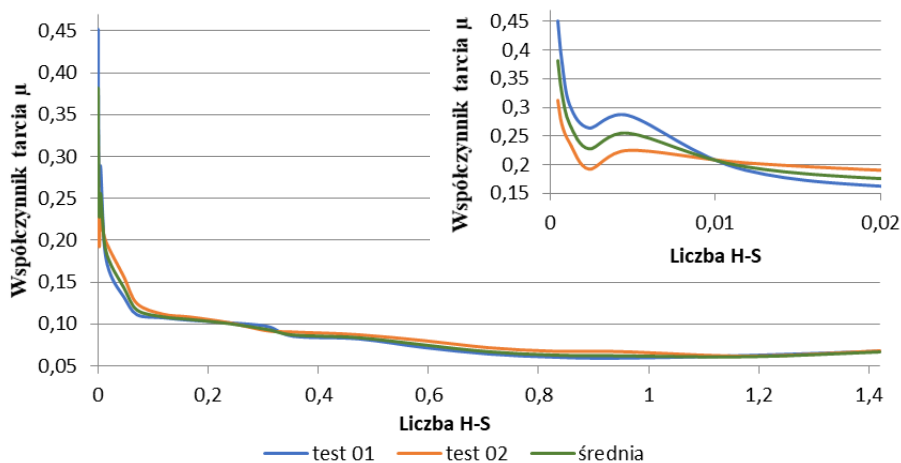
Ślad wytarcia kulki testowej po badaniu Fomblin Y 04 pod obciążeniem 5 N został przedstawiony na rysunku 21. Promień śladu zużycia wyniósł 58,45 μm .



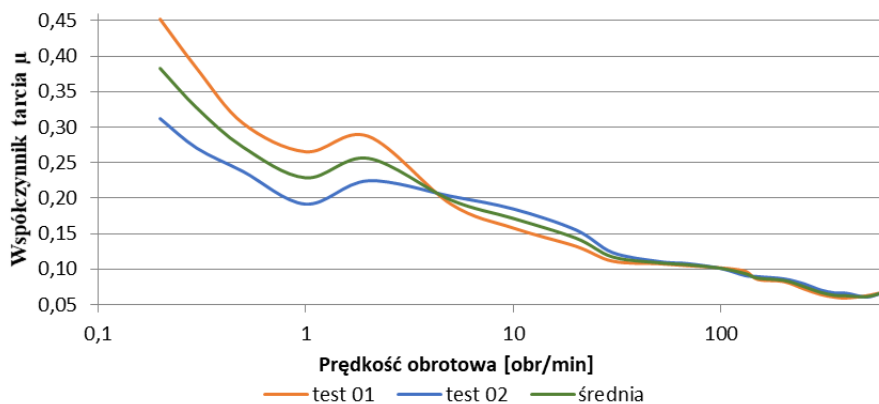
Rys. 21. Ślad wytarcia kulki testowej po badaniu PFPE Fomblin Y 04 pod obciążeniem 5 N

3.3.3. Olej bazowy polialfaolefinowy PAO-6

Zestawienie wyników badań syntetycznej bazy olejowej PAO-6 pod obciążeniem 5 N w postaci charakterystyk Herseya–Stribeck zostało zobrazowane na rysunku 22. Charakter obu przebiegów jest bardzo podobny, wyraźniej różnią się wartością współczynnika tarcia tylko na początku charakterystyk (do liczby H-S $\sim 0,02$). W przypadku PAO-6 w początkowym etapie przebiegu charakterystyk współczynnik tarcia osiągał dużo większe wartości (aż do 0,4514) niż w przypadku pozostałych badanych substancji. Rozbieżność wartości współczynnika tarcia na początku przebiegów sięgała rzędu 0,14. Może to być spowodowane błędami popełnionymi w procesie badawczym, np. różną ilością substancji smarującej lub niedokładnym wyczyszczeniem jednej z próbek przed rozpoczęciem badania. Minimalna zbadana wartość współczynnika tarcia przy badaniu PAO-6 pod obciążeniem 5 N wyniosła 0,0599, co odpowiada prędkości obrotowej próbki $350 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ (rys. 23). PAO-6 wykazuje największą rozpiętość współczynnika tarcia w badanym zakresie ($0,06 \div 0,38$ dla przebiegu średniego).

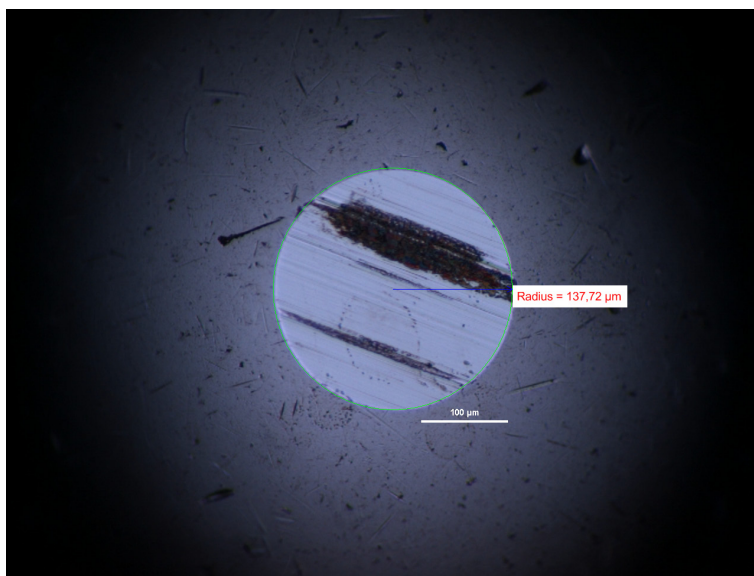


Rys. 22. Charakterystyki Herseya-Stribecka wykreszone dla PAO-6 przy badaniu pod obciążeniem 5 N



Rys. 23. Wykres zależności współczynnika tarcia od prędkości obrotowej próbki dla PAO-6 przy badaniu pod obciążeniem 5 N

Ślad wytarcia kulki testowej po badaniu PAO-6 pod obciążeniem 5 N został przedstawiony na rysunku 24. Promień śladu zużycia wynosił 137,72 μm .

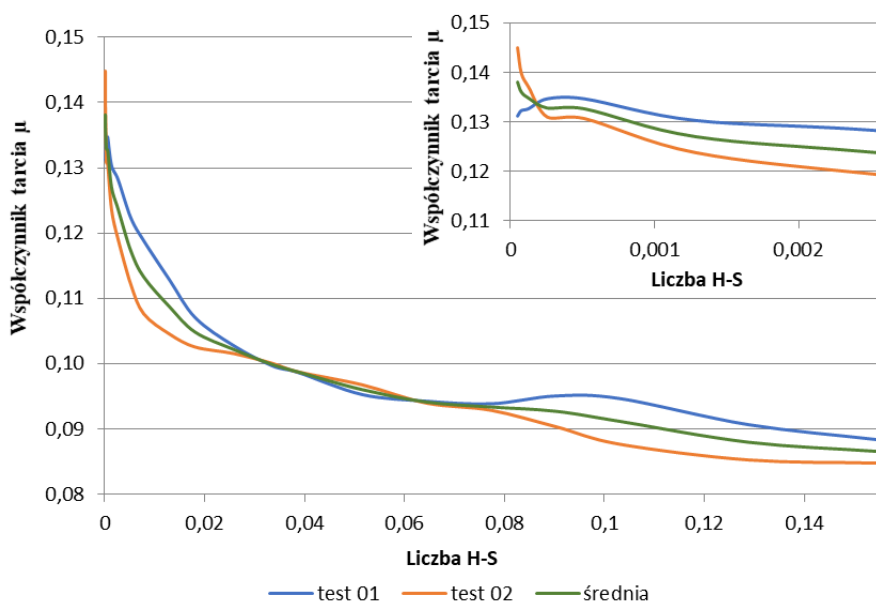


Rys. 24. Ślad wytarcia kulki testowej po badaniu PAO-6 pod obciążeniem 5 N

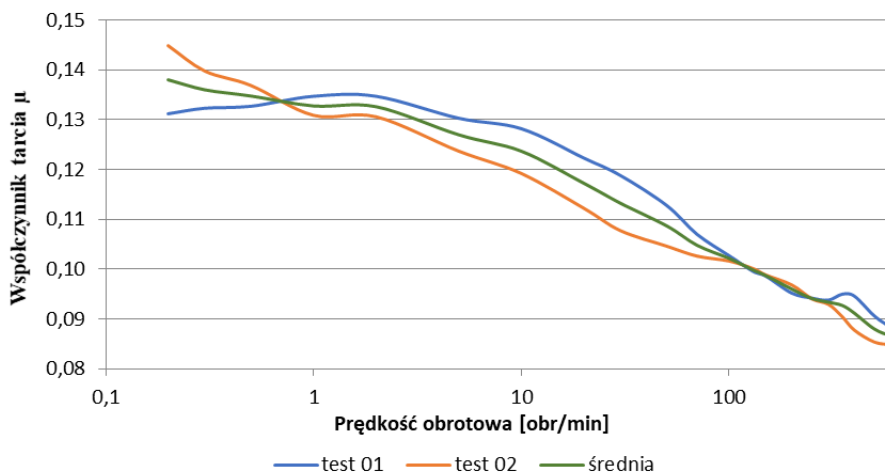
3.4. Wyniki badań przeprowadzonych pod obciążeniem 50 N

3.4.1. Ciecz jonowa CJ 006

Na rysunku 25 zaprezentowane zostały charakterystyki Herseya–Stribecka CJ 006 dla badania pod obciążeniem 50 N. Pomimo niewielkich różnic wartości współczynnika tarcia (maksymalnie 0,01) pomiędzy dwoma testami badawczymi, charakterystyki mają zbliżony przebieg. Potwierdza to prawidłowość wykonania badań. Liczba H-S osiągała małe wartości ($\sim 0,155$) ze względu na duże obciążenie, które we wzorze na liczbę H-S znajduje się w mianowniku. Największa wartość współczynnika tarcia była równa 0,1449 (przy prędkości próbki $0,2 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$), a najmniejsza wynosiła 0,0848 (przy najwyższej badanej prędkości obrotowej próbki). Zależność współczynnika tarcia od prędkości obrotowej próbki przy badaniu CJ 006 pod obciążeniem 50 N została przedstawiona na rysunku 26.

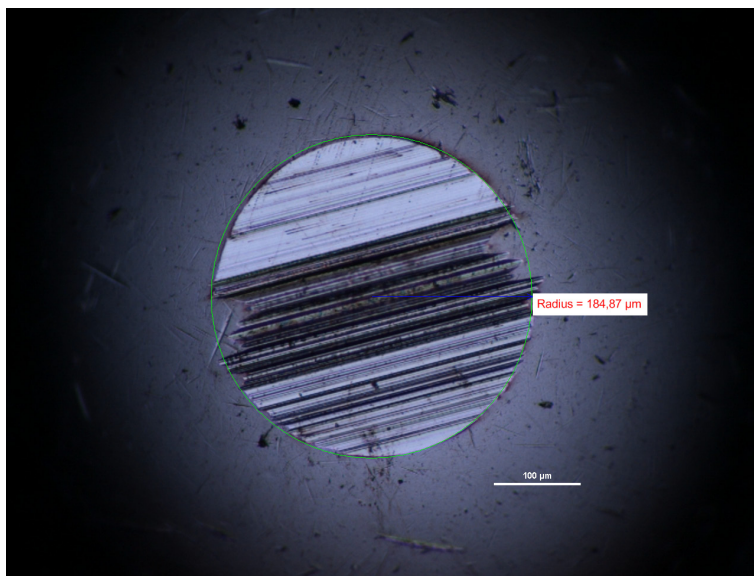


Rys. 25. Charakterystyki Herseya–Stribecka wykreślone dla CJ 006 przy badaniu pod obciążeniem 50 N



Rys. 26. Wykres zależności współczynnika tarcia od prędkości obrotowej próbki dla CJ 006 przy badaniu pod obciążeniem 50 N

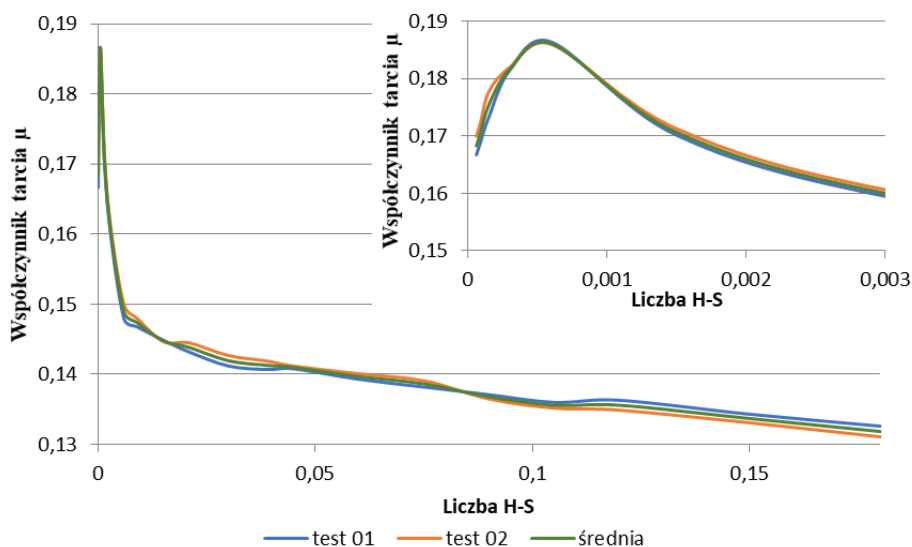
Ślad wytarcia kulki testowej po badaniu CJ 006 pod obciążeniem 50 N został przedstawiony na rysunku 27. Promień śladu zużycia wynosił 184,87 μm .



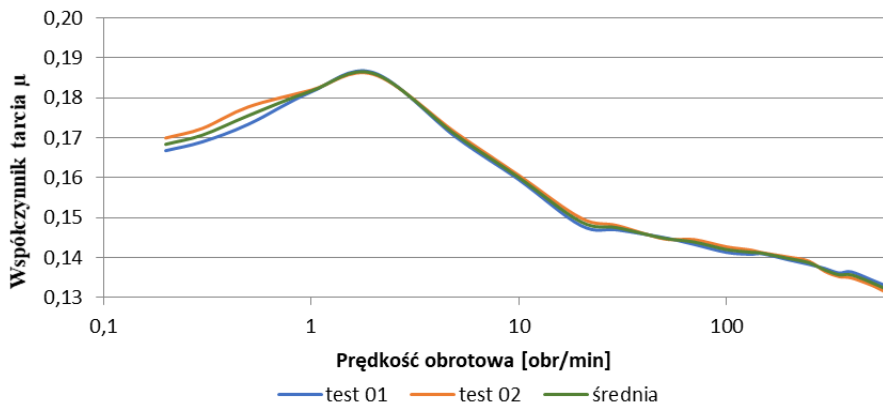
Rys. 27. Ślad wytarcia kulki testowej po badaniu CJ 006 pod obciążeniem 50 N

3.4.2. Ciecz perfluoropolieteterowa PFPE Fomblin Y 04

Olej PFPE Fomblin Y 04 zbadano również pod obciążeniem 50 N. Wyniki tych badań zostały zobrazowane na rysunku 28 w postaci krzywych H-S. Wykonano dwa testy i jak widać na poniższym rysunku, ich przebiegi prawie się nie różnią, zarówno co do charakteru przebiegu, jak i wartości współczynnika tarcia w konkretnych punktach pomiarowych. Maksymalna wartość współczynnika tarcia obserwowana jest dla liczby H-S równej 0,0006 i wynosiła 0,1862. Minimalna wartość współczynnika tarcia w badanym zakresie widoczna była przy największej liczbie H-S i była równa 0,1311. Smarowanie płynne w tym przypadku prawdopodobnie rozpoczyna się przy liczbie H-S równej 0,006, co odpowiada prędkości obrotowej próbki $\sim 20 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$. Widoczne jest to na rysunku 29 ukazującym zależność współczynnika tarcia od prędkości obrotowej próbki w przypadku badania opisywanej cieczy pod obciążeniem 50 N.

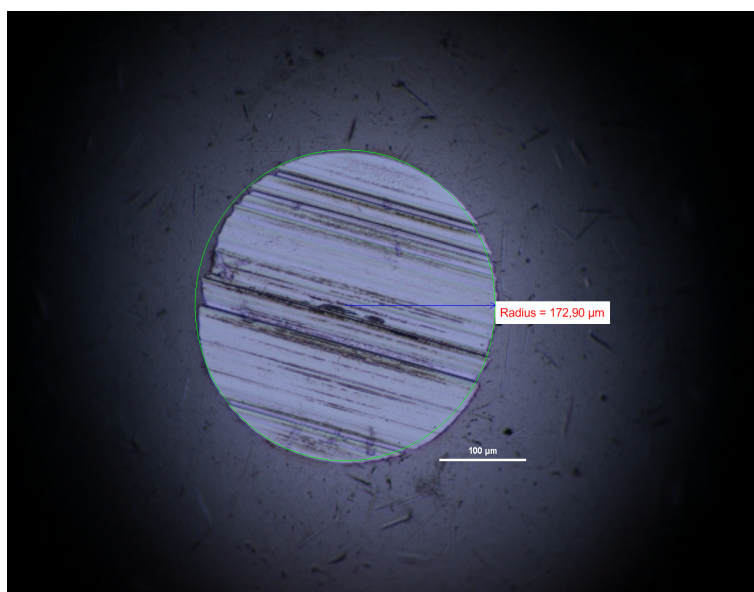


Rys. 28. Charakterystyki Herseya-Stribecka wykreślone dla PFPE Fomblin Y 04 przy badaniu pod obciążeniem 50 N



Rys. 29. Wykres zależności współczynnika tarcia od prędkości obrotowej próbki dla PFPE Fomblin Y04 przy badaniu pod obciążeniem 50 N

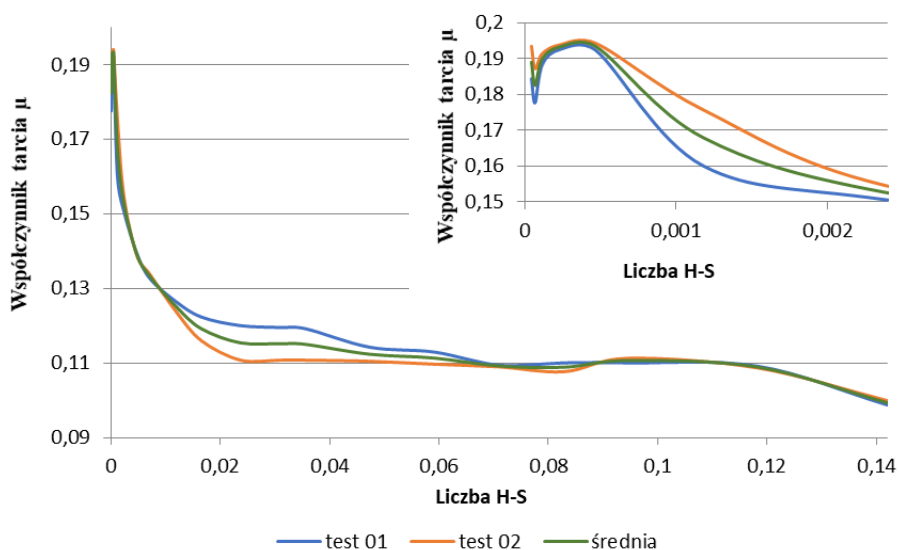
Ślad wytarcia kulki testowej po badaniu Fomblin Y 04 pod obciążeniem 50 N został przedstawiony na rysunku 30. Promień śladu zużycia wyniósł 72,90 μm .



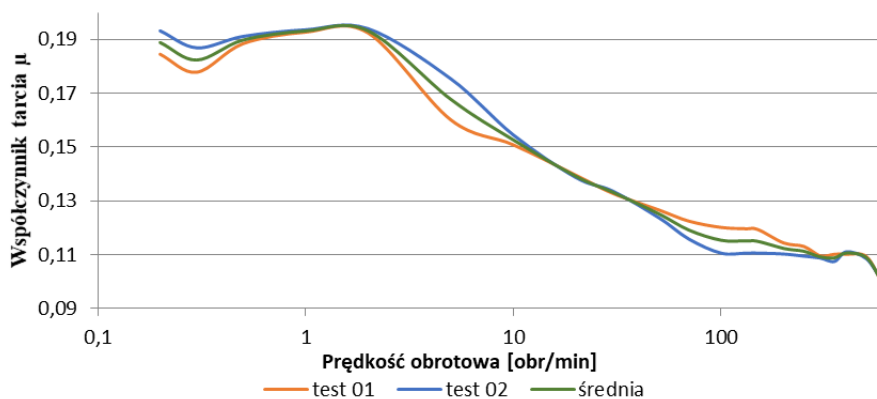
Rys. 30. Ślad wytarcia kulki testowej po badaniu PFPE Fomblin Y 04 pod obciążeniem 50 N

3.4.3. Olej bazowy polialfaolefinowy PAO-6

Ostatnią substancją, którą badano przy zadanym obciążeniu 50 N, była syntetyczna baza olejowa PAO-6. Wyniki tych badań zaprezentowano na rysunku 31 w postaci charakterystyk Herseya–Stribecka. Oba przebiegi badawcze mają bardzo podobny charakter. Współczynnik tarcia osiągał maksymalną wartość (0,1932) przy bardzo małych prędkościach obrotowych próbki ($\sim 2 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$), a najmniejsza zbadana wartość współczynnika tarcia (0,0993) zauważalna była dla największej prędkości obrotowej próbki z zakresu badań ($600 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$). Widoczne jest to na rysunku 32. Interesujący jest zauważalny spadek współczynnika tarcia ($\sim 0,005$) przy prędkości obrotowej próbki $0,3 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ względem prędkości $0,2 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$, a następnie stopniowy wzrost jego wartości ($\sim 0,015$) do prędkości obrotowej $2 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$. Zjawisko to obserwowane było w przypadku obu przeprowadzonych testów dla tej substancji smarującej.

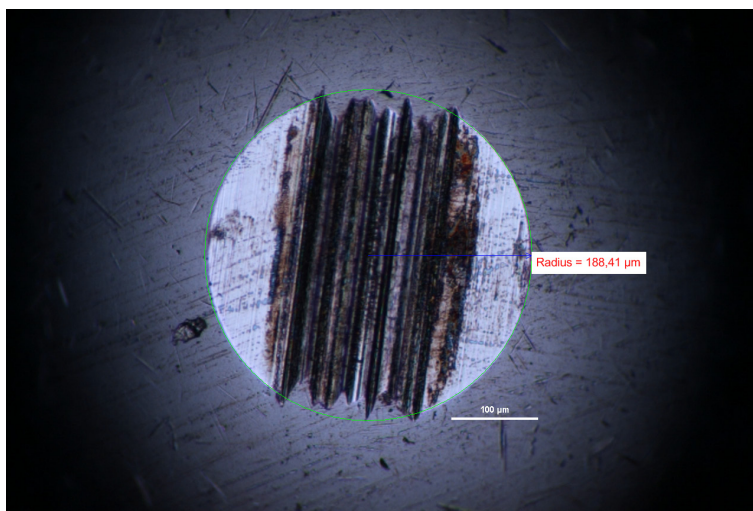


Rys. 31. Charakterystyki Herseya-Stribecka wykreślone dla PAO-6 przy badaniu pod obciążeniem 50 N



Rys. 32. Wykresy zależności współczynnika tarcia od prędkości obrotowej próbki dla PAO-6 przy badaniu pod obciążeniem 50 N

Ślad wytarcia kulki testowej po badaniu PAO-6 pod obciążeniem 50 N został przedstawiony na rysunku 33. Promień śladu zużycia wynosił 188,41 μm .



Rys. 33. Ślad wytarcia kulki testowej po badaniu PAO-6 pod obciążeniem 50 N

4. Podsumowanie i wnioski końcowe

Poniżej w tabeli 2 zebrano średnie wartości wyników badań trzech wybranych cieczy smarujących, badania przeprowadzono na urządzeniu UNMT-CETR (CA, USA) pod obciążeniem 0,25 N, 5 N oraz 50 N.

TABELA 2

Zestawienie wyników badań na UNMT uzyskanych w testach Herseya–Stribecka

Ciecze smarujące	Promień skaz zużycia na kulce testowej po badaniu r [μm]	Maksymalny zbadany współczynnik tarcia (μ_{max})	Minimalny zbadany współczynnik tarcia (μ_{min})	Średni współczynnik tarcia (μ_{sr}) w całym zakresie badania
POD OBCIĄŻENIEM 0,25 N				
Ciecz jonowa CJ 006	63,78	0,1766	0,0564	0,1093
PFPE Fomblin Y 04	25,55	0,1321	0,1159	0,1247
Olej bazowy PAO-6	41,53	0,1487	0,0812	0,1158
POD OBCIĄŻENIEM 5 N				
Ciecz jonowa CJ 006	120,53	0,1934	0,0819	0,1139
PFPE Fomblin Y 04	58,45	0,1746	0,1235	0,1333
Olej bazowy PAO-6	137,72	0,3821	0,0615	0,1464
POD OBCIĄŻENIEM 50 N				
Ciecz jonowa CJ 006	184,87	0,1381	0,0866	0,1101
PFPE Fomblin Y 04	172,90	0,1862	0,1319	0,1512
Olej bazowy PAO-6	188,41	0,1932	0,0993	0,1376

W przypadku bardzo małych obciążeń (tu: 0,25 N) najkorzystniej wypadł, w szczególności przy małych wartościach liczby H-S, perfluoropolieteryowy olej PFPE Fomblin Y 04, który odznacza się największą lepkością dynamiczną ($\eta_{25} = 60,04$ mPa·s) i równocześnie najlepszą zwilżalnością i najmniejszym napięciem powierzchniowym. W tym obszarze olej PFPE generował w związku z tym najmniejsze zużycie ($r = 25,55$ μm) i najmniejszy współczynnik tarcia ($\mu_{max} = 0,1321$) mimo dużych początkowo nacisków wynikających ze styku kuli z płaszczyzną (dla obciążenia 0,25 N $p = 631,2$ MPa). W obszarze większych liczb H-S (smarowania płynnego) znacznie lepsze od PFPE okazały się dwie pozostałe ciecze. Najmniejsze opory tarcia wygenerowała ciecz jonowa ($\mu_{min} = 0,0564$). Przyczyny tego są dwie, tj. mniejsza lepkość cieczy jonowej ($\eta_{25} = 51,03$ mPa·s) i równocześnie większe na początku testu zużycie kulki testowej ($r = 63,78$ μm), co przyczyniło się do zmniejszenia nacisków jednostkowych i wytworzenia tym samym specyficznego obszaru smarowania hydrodynamicznego. Z takich samych powodów w tym obszarze lepiej od PFPE zachowywała się baza olejowa PAO-6 ($r = 41,53$ μm ; $\mu_{min} = 0,0812$). Ostatecznie najmniejszą średnią wartość współczynnika tarcia w całym okresie badawczym uzyskała ciecz jonowa ($\mu_{sr} = 0,1093$), przy czym w początkowym okresie dochodziło do największego zużycia (2,5 razy większego od uzyskiwanego w obecności PFPE). Współczynnik tarcia dla PFPE, średni dla całego okresu badawczego, był nieco większy ($\mu_{sr} = 0,1247$) od uzyskiwanego dla cieczy jonowej ($\mu_{sr} = 0,1093$). Zatem przebieg procesu tarcia pod obciążeniem 0,25 N w obecności PFPE Fomblin Y 04 był bardziej stabilny i zużycie w obecności tej cieczy było najmniejsze.

Niemal taką samą sytuację zidentyfikowano w badaniach pod obciążeniem 20 razy większym, tj. 5 N. Również w pierwszym etapie, gdy próba rozpoczyna się przy bardzo dużych naciskach spowodowanych stykiem quasi-punktowym kula–płaszczyzna (dla obciążenia 5 N są to naciski $p = 1\,713$ MPa), najmniejsze zużycie zarejestrowano w przypadku smarowania PFPE ($r = 58,45$ μm) przy równocześnie najmniejszych oporach tarcia ($\mu_{max} = 0,1746$). Jednak w tym przypadku zalety cieczy jonowej w stosunku do PAO-6 objawiają się nieco wcześniej niż dla obciążenia 0,25 N. Już w tym początkowym obszarze (tj. małych wartości liczby H-S) opory tarcia w obecności cieczy jonowej ($\mu_{max} = 0,1934$) są znacznie mniejsze niż w obecności PAO-6 ($\mu_{max} = 0,3821$) i zużycie w obecności cieczy jonowej ($r = 120,53$ μm) jest mniejsze niż w obecności PAO-6 ($r = 137,72$ μm). Najbardziej stabilny przebieg procesu tarcia pod obciążeniem 5 N był podobny jak pod obciążeniem 0,25 N, w obecności PFPE, natomiast stabilność procesu tarcia w obecności cieczy jonowej CJ 006 była w przybliżeniu taka sama pod obciążeniem 0,25 N i 5 N.

Pod obciążeniem 50 N (tj. 200 razy większym od pierwotnego obciążenia 0,25 N) sytuacja znacząco się zmienia. Pod tym obciążeniem początkowe naciski styku kula–płaszczyzna wynoszą $p = 3\,691$ MPa. Przy tym obciążeniu zużycie jest niemal takie samo, niezależnie od zastosowanej cieczy smarującej, natomiast opory

tarcia są najmniejsze w obecności cieczy jonowej. Współczynnik tarcia w tym przypadku jest mniejszy ($\mu_{max} = 0,1381$) nawet od tych, które zarejestrowano pod obciążeniem 0,25 N ($\mu_{max} = 0,1766$) i 5 N ($\mu_{max} = 0,1934$). W przypadku smarowania PFPE współczynnik tarcia ma prawie taką samą wartość ($\mu_{max} = 0,1862$) jak pod obciążeniem 5 N ($\mu_{max} = 0,1746$). Natomiast przy smarowaniu PAO-6 współczynnik tarcia zmalał ($\mu_{max} = 0,1932$). W drugim etapie, dla większych liczb H-S, tj. w obszarze smarowania płynnego, najlepsze właściwości wykazała także ciecz jonowa. W jej obecności współczynnik tarcia był najmniejszy ($\mu_{min} = 0,0866$) i prawie taki sam jak pod obciążeniem 5 N, a proces tarcia w czasie testu był bardzo stabilny ($\mu_{sr} = 0,0866$). Proces tarcia w obecności PFPE był również zaskakująco stabilny, jednak średni współczynnik tarcia był duży — $\mu_{sr} = 0,1512$. Znacznie lepiej w obszarze smarowania płynnego zachowywał się olej bazowy PAO-6 ($\mu_{sr} = 0,1376$).

Podsumowując uzyskane wyniki badań i powyższą analizę, można stwierdzić, że w warunkach małych obciążeń w styku kula–płaszczyzna efektywne smarowanie, objawiające się małymi współczynnikami tarcia i małym zużyciem, zapewnił olej porfluoropolieteryowy PFPE Fomblin Y 04. Jednak wraz ze wzrostem obciążenia skuteczność tego oleju była coraz gorsza, szczególnie w początkowym etapie procesu tarcia, gdy naciski jednostkowe były bardzo duże. Jedną z przyczyn mogła być słaba odporność PFPE Fomblin Y 04 na rosnącą temperaturę generowaną podczas tarcia pod dużym obciążeniem i spadek lepkości (indeks lepkości: $VI = 56$), co mogło prowadzić do przerywania filmu smarującego. Pod obciążeniem 50 N najefektywniejsza okazała się ciecz jonowa CJ 006, która w obszarze początkowym wykazała najmniejszy współczynnik tarcia ($\mu_{max} = 0,1381$), a w obszarze smarowania płynnego była najskuteczniejsza niezależnie od zastosowanego obciążenia, uzyskując stale najmniejsze wartości współczynnika tarcia ($\mu_{min} = 0,0504 \div 0,0866$) i w efekcie niemal stałą wartość współczynnika tarcia w całym okresie badań ($\mu_{sr} = 0,1093 \div 0,1139$).

Ostatecznie wnioski końcowe z tych badań mogą być następujące:

- olej pefluoropolieteryowy PFPE Fomblin Y 04 wykazał najlepsze właściwości tribologiczne w przypadku małych obciążeń (tu: 0,25 N; 5 N) styku kula–płaszczyzna, podczas tarcia ślizgowego w ruchu obrotowym, szczególnie w początkowym okresie realizowanego procesu tarcia, tj. dla małych liczb H-S;
- najlepsze właściwości tribologiczne pod dużym obciążeniem (tu: 50 N) w całym okresie badań wykazała ciecz jonowa CJ 006, tj. bis(trifluorometylosulfonylo)imid-3-metylo-1-propylopirydynowy. Ciecz ta była również najskuteczniejsza w obszarze smarowania płynnego niezależnie od zastosowanego obciążenia.

Źródło finansowania pracy — działalność statutowa Wojskowej Akademii Technicznej.

Artykuł wpłynął do redakcji 14.03.2019. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 12.06.2019.

Tadeusz Kałdoński <https://orcid.org/0000-0001-6483-3739>

Krzysztof Gocman <https://orcid.org/0000-0002-6515-7178>

Tomasz Jan Kałdoński <https://orcid.org/0000-0002-3780-7604>

LITERATURA

- [1] KAŁDOŃSKI T., *Podstawowe problemy analizowania procesów tribologicznych*, WAT, Warszawa 2015.
- [2] KAŁDOŃSKI T.J., *Badania i ocena alkoksymetyloimidazolowych cieczy jonowych jako nowych smarów dla stalowych węzłów tribologicznych*, (rozprawa doktorska), Wydział Mechaniczny, WAT, Warszawa, 2012.
- [3] KAŁDOŃSKI T. (red), *Porowate łożyska ślizgowe nowej generacji*, WAT, Warszawa 2013.
- [4] UNMT Multi-Specimen Test System User's Manual Addendum Center for Tribology 1715 Dell Ave, Campbell CA 95008, USA 2008.
- [5] Instrukcja KSV Sigma 701: Operation Manual Surface/Interfacial Tension DCA Meter (www.ksvltd.com).
- [6] Polska Norma: PN-ISO 2909: 2009. *Przetwory naftowe. Obliczanie wskaźnika lepkości na podstawie lepkości kinematycznej*.
- [7] Polska Norma: EN-ISO 3104: 2004. *Przetwory naftowe. Ciecze przezroczyste i nieprzezroczyste. Oznaczanie lepkości kinematycznej i obliczanie lepkości dynamicznej*.
- [8] Polska Norma: PN-ISO 3016: 2005. *Przetwory naftowe. Oznaczanie temperatury płynięcia*.
- [9] Instrukcja ISL-CPP 97-2, *Instrumentation Scientifique de Laboratoire — Cloud, Pour Point 97-2*.
- [10] KAŁDOŃSKI T.J., *Research on alkylimidazolium ionic liquids as lubricants for steel tribological nodes*, Military University of Technology, Warsaw, 2016.
- [11] WASSERSCHEID P., WELTON T. (eds.), *Ionic Liquids in Synthesis*, Second Completely Revised and Enlarged Edition Wiley – WCH Verlag GmbH & Co. KgaA, Weinheim 2008.
- [12] FITCHET B.D., KNEPP T.M., CONBOY J.C., *1-alkyl-3-methylimidazolium bis(perfluoro alkylsulfonil) imide water immiscible ionic liquids*, Journal of Electrochemical Society, 151, 2004, E 219.
- [13] FREIRE M.G., CARVALHO P.J., FERNANDES A.M., MARRUCHO J.M., QEIMADA A.J., CANTINHO J.A.P., *Surface tension of imidazolium based ionic liquids: Anion, Cation, Temperature and Water effect*, Journal of Colloid and Interface Science, 314, 2007, pp. 621-630.
- [14] ARANOWSKI A., *Ocena właściwości tribologicznych olejów na podstawie charakterystyk Hersey-Stribecka* (praca dyplomowa), Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2017.
- [15] KAMIMURA H., KUBO T., MIRAMI J., MORI S., *Effect and Mechanism of Additive for Ionic Liquids as New Lubricants*, Tribology International, 40, 2007, pp. 620-625.

A. ARANOWSKI, T. KAŁDOŃSKI, K. GOCMAN, T.J. KAŁDOŃSKI

Evaluation of tribological properties of lubricants based on Hersey's–Stribeck's characteristics

Abstract. The content of the paper presents the results of investigations of selected lubricants. The study led to obtaining Hersey's–Stribeck's curves and to comparison of the lubricating properties of lubricants belonging to different groups such as hydrocarbon oils, perfluoropolyether oils (PFPE), and ionic liquids. The following liquids were evaluated for tribological properties: PAO-6 polyalphaolefin oil base, CJ 006 ionic liquid (3-methyl-1-propylpyridinium bis(trifluoromethylsulphonyl)-imide) and Fomblin Y 04 synthetic perfluoropolyether oil. The research was carried out using the universal nano/micro tribotester (UNMT-CETR, CA, USA) at the Department of Tribology, Surface Engineering and Service Fluids Logistics, Faculty of Mechanical Engineering, Military University of Technology. The study consisted of friction of a ball bearing steel (100 Cr 6) with a round specimen of a certain roughness (ball-on-disc). Friction occurred in rotational motion of the specimen, at different rotational speeds at constant radius and at constant load (0.25 N; 5 N; 50 N). The friction node was lubricated with the tested liquid.

Keywords: tribology, friction factor, Hersey's–Stribeck's characteristics

DOI: 10.5604/01.3001.0013.3007

