



Ciecze smarujące dla techniki kosmicznej i metody ich badania

TADEUSZ KAŁDOŃSKI, PIOTR PAWEŁ WOJDYNA

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2, tkaldonski@wat.edu.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę światowej literatury źródłowej [1-60] dotyczącej cieczy smarujących stosowanych do smarowania węzłów tribologicznych techniki kosmicznej, scharakteryzowano wymagania stawiane cieczom smarującym w zastosowaniach kosmicznych oraz ich metody badań, opisano trendy rozwojowe cieczy smarujących przeznaczonych do stosowania w kosmosie.

Słowa kluczowe: tribologia, technika kosmiczna, ciecze smarujące

1. Wstęp

Kosmos od wieków jest obiektem zainteresowania człowieka. Razem z rozwojem nauki, człowiek może coraz dokładniej badać obiekty kosmiczne. W XX wieku możliwe stały się loty w kosmos. W 1957 roku radziecki satelita Sputnik 1 został wyniesiony na orbitę Ziemi. Pierwsze lądowanie człowieka na Księżycu nastąpiło w 1969 roku podczas misji Apollo 11. Amerykanin Neil Armstrong, jako pierwszy człowiek, stanął na Księżycu [57].

Dzięki udanym próbom podboju kosmosu zaczęto realizować coraz trudniejsze i dłuższe misje. Pożądaný okres poprawnej pracy urządzeń zwiększył się i dzisiaj często wynosi do 20, a nawet 30 lat [55]. Polska coraz częściej bierze udział w realizacji takich międzynarodowych programów kosmicznych, prowadząc różnego rodzaju badania za pomocą własnych urządzeń wysyłanych w kosmos. Często ruchome elementy tych urządzeń muszą być smarowane odpowiednio dobranymi substancjami smarującymi. Dobór takiej substancji nie jest łatwy, tym bardziej, że

warunki pracy smaru w przestrzeni kosmicznej są odmienne od tych panujących na Ziemi. Przede wszystkim są to: brak pola grawitacyjnego, bardzo niskie ciśnienie otoczenia (10^{-13} - 10^{-16} Tr), ekstremalne i zmienne temperatury (-60 - 200°C), brak tlenu i azotu cząsteczkowego (występuje nietrwały, jednoatomowy).

Dla potrzeb techniki kosmicznej wykonano badania wielu środków smarujących. Oto najbardziej popularne ciecze smarujące, jakie znalazły zastosowanie w technice kosmicznej: silikony, oleje mineralne, perfluoropolietyry (PFPE), polialfaolefiny (PAO), wielokrotnie alkilowane cyklopentany (MACs¹). Ponadto prowadzone są badania nad innymi cieczami smarującymi, takimi jak węglowodory krzemowe (SiHC²), a także ciecze jonowe. Dzięki swoim właściwościom ciecze jonowe mogą okazać się idealnymi cieczami smarującymi w ciężkich warunkach pracy, w próżni, w ekstremalnych temperaturach. Dlatego istnieje potrzeba ciągłych badań właściwości smarnych cieczy jonowych. Badania takie są prowadzone m.in. w Zakładzie Tribologii, Inżynierii Powierzchni i Logistyki Płynów Eksploatacyjnych IPMiT WAT [34, 35]. Należy pamiętać o tym, że wszystkie środki smarne mają swoje zalety i wady. Substancja, która jest idealna dla jednego mechanizmu, niekoniecznie musi być odpowiednia dla innego. W niektórych przypadkach wystarczy, że nieznacznie zmieni się materiał lub rodzaj obróbki współpracujących elementów i środek smarny stosowany wcześniej już nie będzie spełniał swoich funkcji [2].

Na początku XXI w. planowany jest powrót człowieka na Księżyc, w dalszej perspektywie podróż człowieka na Marsa, a więc loty załogowe w miejsca znacznie bardziej odległe od Ziemi [8]. Załogowy lot na Marsa będzie ogromnym wyzwaniem, z którym dzisiejsze technologie mogą sobie nie poradzić.

2. Ciecze smarujące stosowane obecnie w technice kosmicznej

2.1. Silikony

Silikony to polimery³ składające się głównie z wielkocząsteczkowych związków krzemooorganicznych polisiloksanów, których główny łańcuch zbudowany jest z naprzemiennie ułożonych atomów tlenu i krzemu (...-Si-O-Si-O-...), połączonego również z atomem węgla.

Lepkość kinematyczna olejów silikonowych rośnie wraz ze wzrostem stopnia polimeryzacji (czyli wraz ze wzrostem masy molowej polimerów). Poprzez polimeryzację zakończoną na kilku-kilkunastu cząsteczkach można otrzymać oleiste ciecze [1].

¹ MACs — z ang. *Multiply-Alkylated Cyclopentanes*.

² SiHC — z ang. *Silhydrocarbons*.

³ Polimery to związki o bardzo dużych cząsteczkach o budowie łańcuchowej. Ich masy cząsteczkowe przekraczają na ogół 10 000 u.

Silikony, ze względu na niską prężność par i temperaturę krzepnięcia, były często wykorzystywane jako ciecze smarujące w pierwszych misjach kosmicznych. Dzisiaj nie używa się olejów silikonowych do smarowania w technice kosmicznej ze względu na tendencję do rozrywania się filmu oleju silikonowego lub wyciskania z obszaru tarcia pod wpływem obciążenia [13].

Dzięki swojej ściśliwości i małym zmianom lepkości w szerokim zakresie temperatur silikon są dzisiaj jeszcze wykorzystywane w niektórych układach hydraulicznych techniki kosmicznej. Ściśliwość olejów silikonowych jest znacznie większa niż olejów mineralnych. Przy zmianie temperatury od -40°C do 70°C siła tłumienia amortyzatorów cieczowych wykorzystujących oleje silikonowe zmniejsza się tylko trzy razy, w przypadku hydraulicznych olejów mineralnych około 2000 razy. W sprężynach hydraulicznych nóg lądownika pojazdu kosmicznego Surveyor VI wykorzystano olej fluorosilikonowy, dzięki czemu możliwe było rozciągnięcie sprężyn w ekstremalnych warunkach termicznych panujących na Księżycu podczas bezzałogowej misji [3, 13].

2.2. Oleje mineralne

Oleje mineralne to mieszanina ciekłych węglowodorów otrzymywana z pozostałości po destylacji atmosferycznej ropy naftowej zawierająca dodatki.

Najlepsze, ze względu na dobre właściwości smarne, dobre charakterystyki lepkościowo-temperaturowe, niską temperaturę krzepnięcia, są oleje mineralne, które zawierają węglowodory ciekłe z długimi bocznymi łańcuchami parafinowymi [1].

W porównaniu do innych rozpatrywanych cieczy smarujących dla techniki kosmicznej oleje mineralne posiadają najwyższą prężność par. Są to ciecze smarujące, które dobrze pracują w warunkach smarowania granicznego i elastohydrodynamicznego. Jednak bardzo szybko stają się niezdatne i zmniejsza się ich ilość w smarowanym skojarzeniu. Ze względu na pojawienie się olejów syntetycznych i innych cieczy smarujących, które posiadają znacznie lepsze właściwości, oleje mineralne przestały być powszechnie stosowane. Do dzisiaj jeszcze można spotkać oleje mineralne w całkowicie uszczelnionych mechanizmach, takich jak łożyska stabilizatora żyroskopu, czy też mechanizmy przeciwwirowe [27 za 10].

2.3. Perfluoropolietyry (PFPE)

Perfluoropolietyry to ciekłe związki chemiczne, pochodne polieterów, otrzymywane poprzez polimeryzację perfluorowanych monomerów, w reakcji pochodnych fluorowych tlenków alkilowych ze związkami zawierającymi aktywny wodór (np. z wodą), pochodnymi fluorowymi alkoholi lub kwasów organicznych [58]. Jednymi z pierwszych perfluoropolieterów były ciecze o oznaczeniu K wytworzone przez polimeryzację tlenku heksafluoropropenu w obecności katalizatora

(CsF — fluorku cezu) [30 za 19]. W technice kosmicznej zastosowanie znalazły perfluoropolietero y oznaczeniach K i Z, a także w niewielkim stopniu D [30].

TABELA 2.1

Wzory sumaryczne czterech perfluoropolieterów, gdzie X wynosi od 10 do 60, a stosunek X/Y wynosi od 0,6 do 0,7 [30]

Oznaczenie perfluoropolieteru	Wzór sumaryczny
D	$C_3F_7O(CF_2CF_2CF_2O)_XC_2F_5$
K	$C_3F_7O[CF(CF_3)CF_2O]_XC_2F_5$
Y	$C_3F_7O[CF(CF_3)CF_2O]_X(CF_2O)_YC_2F_5$
Z	$CF_3O(CF_2CF_2O)_X(CF_2O)_YCF_3$

TABELA 2.2

Wybrane właściwości fizyczne czterech perfluoropolieterów [30]

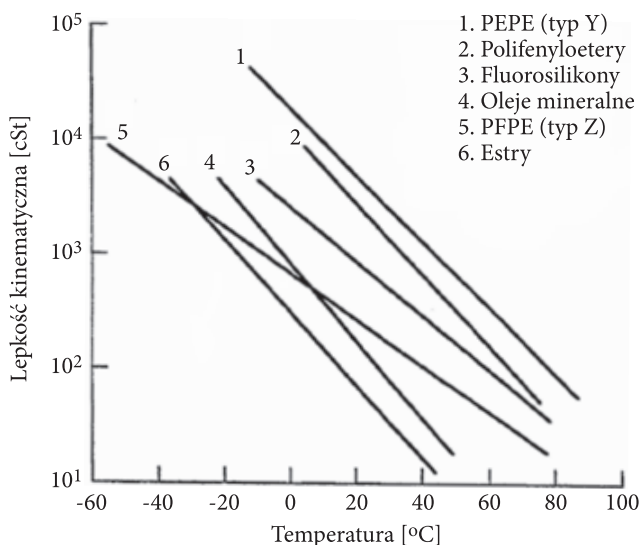
Ciecz smarująca	Średnia masa cząsteczkowa	Lepkość kinematyczna w 200°C [cSt]	Wskaźnik lepkości	Temperatura krzepnięcia [°C]	Prężność par [Pa]	
					przy 20°C	przy 100°C
Z (Z-25)	9500	255	355	-66	$3,9 \times 10^{-10}$	$1,3 \times 10^{-6}$
K(143AB)	3700	230	113	-40	$2,0 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-2}$
K(143AC)	6250	800	134	-35	$2,7 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-3}$
D (S-200)	8400	500	210	-53	$1,3 \times 10^{-8}$	$1,3 \times 10^{-5}$

Niska temperatura krzepnięcia i znikoma prężność pary perfluoropolieterów (w szczególności o oznaczeniu Z) umożliwiają stosowanie ich w aplikacjach pracujących przez wiele lat (od 7 do 30 lat) [30 za 22].

Niskie napięcie powierzchniowe (od 18 do 24 dyna/cm przy 20°C) gwarantuje, że perfluoropolieter dotrze do najmniejszych luk w mechanizmach, które smaruje, oraz zapewnia duże powinowactwo cieczy smarującej ze smarowaną powierzchnią [56].

Wysoka wartość wskaźnika lepkości, w porównaniu do innych cieczy smarujących, sprawia, że perfluoropolietero y są jednymi z najbardziej odpowiednich cieczy smarujących do urządzeń wymagających jak najmniejszych zmian lepkości w szerokim zakresie temperatur [56]. Na wykresie (rys. 2.1) przedstawiono zależność lepkości kinematycznej od temperatury dla różnych rodzajów cieczy smarujących.

Perfluoropolietero y są dobrymi cieczami smarującymi w warunkach smarowania hydrodynamicznego i elastohydrodynamicznego.



Rys. 2.1. Zmiana lepkości w zależności od temperatury dla różnych rodzajów cieczy smarujących [13 za 49]

Podczas smarowania granicznego perfluoropolietery reagują ze smarowanymi powierzchniami, wtedy powstają korozyjne gazy, a w rezultacie fluorki metali. W ten sposób dochodzi do degradacji perfluoropolietarów. Zatem stosowanie czystych perfluoropolietarów w warunkach smarowania granicznego wydaje się niewskazane. Również pod wpływem promieniowania rentgenowskiego perfluoropolietery są podatne na degradację. Przebieg degradacji perfluoropolietarów jest ściśle zależny od warunków pracy, jakie występują w określonym skojarzeniu.

Wstępne badania przeprowadzone w warunkach tarcia granicznego na trzech perfluoropolietarach (o oznaczeniach K (Krytox), Z (Fomblin), D (Demnum)) na próżniowym aparacie czterokulowym (w powietrzu i pod ciśnieniem od 10^{-4} do 10^{-6} Pa, przy obciążeniu 600 N, prędkości obrotowej 100 obr/min, w temperaturze około 23°C) pokazały, że [44]: większe zużycie występuje w próżni niż w powietrzu, stosując Krytox uzyskano najniższe zużycie w powietrzu, stosując Krytox i Demnum uzyskano najniższe zużycie w próżni, jedynie podczas zastosowania Krytoxu nie wykazano zużycia podobnego do scuffingu.

Dodatki, jakie można zastosować do perfluoropolietarów, to β -diketon, fosforan trikrezylu (TCP^4), fosforowódór, fosforan triazyny, kwas karboksylowy. Pewną poprawę można otrzymać, stosując także syntetyczne węglowodory, a także poprzez zmianę materiałów, z jakich jest wykonane określone skojarzenie [32 za 50].

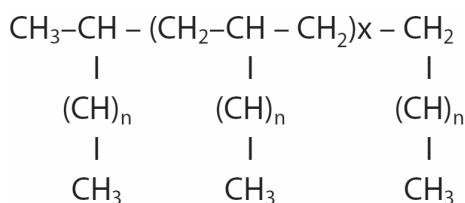
⁴ TCP — z ang. *tricresyl phosphate*.

Perfluoropolietyery bez dodatków są ciągle odpowiednie dla mniej wymagających aplikacji. Dla aplikacji pracujących w trudnych warunkach wskazane jest stosowanie perfluoropolieterów z dodatkami.

2.4. Syntetyczne węglowodory

Obecnie powszechnie dostępne są dwie grupy syntetycznych węglowodorów: polialfaolefiny (PAO) oraz wielokrotnie alkiłowane cyklopentany (MACs).

Polialfaolefiny (PAO) powstają w procesie oligomeryzacji⁵ liniowych α -olefin posiadających sześć lub więcej atomów węgla w cząsteczce, a następnie uwodornienia otrzymanego oligomeru⁶ do oligomeru, który nie posiada podwójnych wiązań [58]. W ten sposób powstaje mieszanina monomerów, dimerów i polimerów, którą rozdestylowuje się na frakcje o pożądaną lepkość kinematyczną.



Rys. 2.2. Budowa cząsteczki polialfaolefin, gdzie $n \geq 7$, x wynosi od 1 do 4 [58]

Polialfaolefiny posiadają niską temperaturę krzepnięcia. Ich prężność par jest mniejsza niż olejów mineralnych. Charakteryzują się wysokim wskaźnikiem lepkości. W tabeli 2.3 zostały podane wybrane właściwości cieczy smarującej Nye 179 należącej do grupy polialfaolefin.

Wybrane właściwości Nye 179 [13]

TABELA 2.3

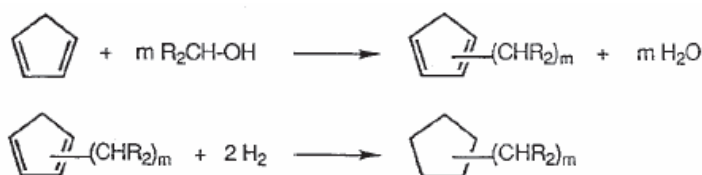
Nazwa	Lepkość kinematyczna w 40°C [cSt]	Wskaźnik lepkości	Temperatura krzepnięcia [°C]	Prężność par przy 20°C [Pa]
Nye 179	30	139	< -60	$9,0 \cdot 10^{-7}$

Polialfaolefiny (PAO) posłużyły także jako materiał do produkcji nowych syntezowanych węglowodorów — wielokrotnie alkiłowanych cyklopentanów (MACs).

⁵ Oligomeryzacja to proces przemiany monomeru w oligomer.

⁶ Oligomery podobnie jak polimery są utworzone z fragmentów (merów), ale składają się z niewielkiej liczby merów.

Do wytworzenia MACs mogą posłużyć dicyklopentadieny i alkohole alifatyczne. Bardzo istotne jest to, że właściwości MACs mogą być regulowane poprzez zmianę alkoholu użytego podczas syntezy. Powstają w reakcji cyklopenta-1,3-dienu, który wcześniej został wyprodukowany poprzez rozkład dicyklopentadienu, z różnymi alkoholami w obecności mocnej zasady. Następnie produkt tej reakcji zostaje uwodorniony do produktu finalnego, którym jest mieszanina di-, tri-, tetra-, pentaalkilowanych cyklopentanów. Poprzez dobór warunków, w jakich reakcja jest przeprowadzana, można określić, który z cyklopentanów będzie dominował w mieszaninie [52].



Rys. 2.3. Schemat powstawania wielokrotnie alkilowanych cyklopentanów (MACs), gdzie m wynosi od 2 do 5 [52]

Lepkość kinematyczna MACs w 100°C zależy głównie od ich średniej masy cząsteczkowej. Może być regulowana poprzez: zmianę liczby atomów węgla w każdej grupie alkilowej oznaczonej R na rysunku 2.3 oraz przez zmianę liczby grup alkilowych R przyłączonych do każdego cyklopentanu. Dla przykładu w tabeli 2.4 podano wartości lepkości kinematycznej kilku wybranych MACs.

TABELA 2.4

Właściwości wielokrotnie alkilowanych cyklopentanów (MACs) w zależności od grupy alkilowej zawartej w cząsteczce MACs [52]

Grupa alkilowa R	Liczba grup oznaczona m	Lepkość kinematyczna w 100°C [mm^2/s]	Wskaźnik lepkości	Temperatura krzepnięcia [$^\circ\text{C}$]
octyl	2	2,18	135	-24
dodecyl	4,5	11,91	153	-9
izotridecyl	3,4,5	20,09	71	-27
2-octyldodecyl	2,3	14,56	137	-57

Dla MACs wskaźnik lepkości zmienia się w przewidywalny na podstawie budowy cząsteczki sposób. Wskaźnik lepkości MACs najsilniej zależy od grup alkilowych R . Im większa średnia masa cząsteczkowa i mniejsza liczba grup m w cząsteczce, tym większy jest wskaźnik lepkości. Poprzez zmieszanie ze sobą różnych MACs można

otrzymać ciecz smarującą o pożądanym wskaźniku lepkości, a także innych wymaganych właściwościach [52].

Temperatura krzepnięcia wielokrotnie alkilowanych cyklopentanów (MACs) zależy od budowy cząsteczki, a dokładniej od [52]:

- liczby atomów węgla dla określonej grupy alkilowej, im jest ona wyższa, tym niższa jest temperatura krzepnięcia,
- liczby podstawników, im jest ich więcej, tym mniejsza jest temperatura krzepnięcia,
- występowania rozgałęzionych grup alkilowych, które obniżają wartość temperatury krzepnięcia, w przeciwieństwie do liniowych grup alkilowych.

Węglowodory syntetyczne dają możliwość dobierania właściwości fizycznych w bardzo szerokim zakresie. Poprzez odpowiedni wybór podstawników można otrzymać pożądane parametry. W przypadku MACs wskaźnik lepkości i temperatura krzepnięcia rosną wraz ze wzrostem długości łańcucha cząsteczki. Polialfaolefiny (PAO) oraz MACs są cieczami o bardzo niskich temperaturach krzepnięcia. Także niska lotność i testy tribologiczne przeprowadzane na próżniowym aparacie czterokulowym oraz na aparacie SOT (p. 4) udowadniają, że wielokrotnie alkilowane cyklopentany (MACs) spełniają wymagania stawiane cieczom smarującym przeznaczonym do długoletnich misji kosmicznych [11, 25, 29].

2.5. Ciecze jonowe

Sole, których temperatura topnienia jest niższa niż 100°C, zostały nazwane cieczami jonowymi. Ciecze jonowe często określane są poprzez skrót ILs⁷ [4]. Sole, które topią się poniżej temperatury 25°C, nazwane zostały niskotemperaturowymi cieczami jonowymi (RTILs⁸). Niskotemperaturowe ciecze jonowe początkowo były wykorzystywane jako elektrolit do baterii [20]. Obecnie to najnowsza grupa substancji rozpatrywanych jako smary w aplikacjach kosmicznych.

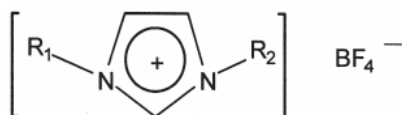
Ciecze jonowe zazwyczaj składają się z organicznego kationu, który zawiera azot lub fosfor, oraz z anionu. Najpowszechniej spotykanymi kationami są: fosfonowy, imidazolowy, pirydynowy, amonowy, a najczęściej wykorzystywanymi anionami są te o dużej liczbie atomów fluoru (BF₄⁻, PF₆⁻, CF₃SO₃⁻, N(CF₃SO₂)₂⁻). Poprzez zmianę kombinacji kationów i anionów możliwe jest tworzenie cieczy jonowych o pożądanym właściwościach, tzw. *Task Specific Ionic Liquids* (TSILs) [4].

Ciecze jonowe powstają w reakcji syntezy. Podczas wymiany jonowej, wprowadzony zostaje odpowiedni anion. Reakcję tę należy kontrolować, niewskazane jest pozostawienie wolnych jonów. Wolne jony mogą negatywnie wpłynąć na właściwości cieczy jonowych i przeprowadzenie reakcji syntezy.

⁷ ILs — z ang. *Ionic Liquids*.

⁸ RTILs — z ang. *Room-Temperature Ionic Liquids*.

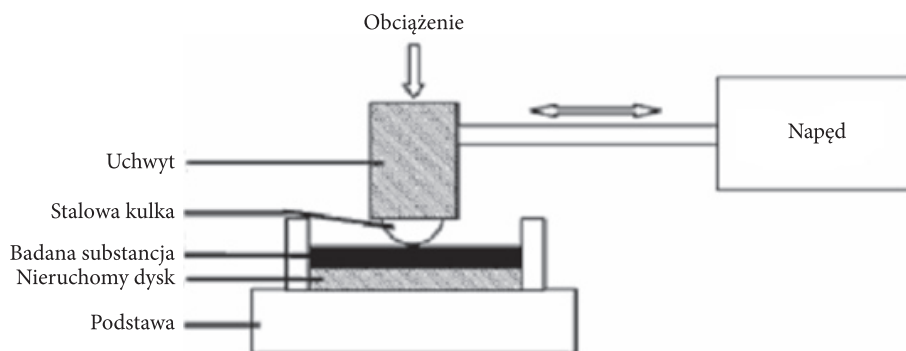
Na przykładzie syntezy chlorku 1-butylo-3-metyloimidazolowego zostanie opisane powstawanie cieczy jonowych. Ciecze jonowe w tym przypadku powstają w reakcji n-alkiloimidazolu z solą alkilową w obecności rozpuszczalnika. Chlorobutan i 1-metyloimidazol w równych ilościach wprowadza się do kolby i miesza w stałej temperaturze 70°C przez 24 do 72 godzin, aż do otrzymania dwóch faz. Następnie górną fazę, składającą się z nieprzereagowanych substratów, należy zdekantować⁹. Resztę należy przepłukać octanem etylu, aż do usunięcia wszystkich nieprzereagowanych składników, pozostałość rozpuszczalnika (tzn. octanu etylu) odparować w wyparce próżniowej w temperaturze 70°C. W ten sposób otrzymuje się ciecz jonową o barwie jasnożółtej i temperaturze topnienia około 70°C [23].



Rys. 2.4. Budowa cząsteczki cieczy jonowych, gdzie R_1 i R_2 to różne grupy alkilowe [54]

Ciecze jonowe, z punktu widzenia aplikacji kosmicznych, posiadają wiele pożądanych właściwości, m.in.: bardzo niską lotność, wysoką termostabilność, niską temperaturę topnienia, niektóre z nich dobrze mieszają się ze związkami organicznymi [53]. Mają potencjał, aby zastąpić używane do dzisiaj ciecze smarujące w technice kosmicznej, które wykazują pewne wady (np. perfluoropolietery mogą ulegać rozkładowi w warunkach tarcia granicznego).

Za pomocą aparatu SRV (oscylacyjny tribotester produkcji niemieckiej) zostały zbadane współczynnik tarcia i zużycie w obecności kilku cieczy jonowych, w atmosferze powietrza i w próżni, dla różnych materiałów [7]. Na rysunku 2.5 przedstawiono zasadę działania tego aparatu.



Rys. 2.5. Schemat aparatu SRV [7]

⁹ Dekantacja to zlewanie cieczy z nad osadu, który zalega na dnie.

Kulka o średnicy 10 mm ślizgała się po dysku z amplitudą 1 mm pod obciążeniem 50 N. Test został przeprowadzony przy częstotliwości 25 Hz i trwał 30 min. Dwie krople cieczy smarującej zostały podane do miejsca kontaktu kulki i dysku. Badania zostały przeprowadzone dla różnych materiałów, z których wykonano kulkę i dysk. Dla porównania takie same testy zrobiono dla perfluoropolietery i fosfazenu (X-1P), a więc cieczy smarujących powszechnie używanych w technice kosmicznej [39]. W tabeli 2.5 zostały zamieszczone wybrane właściwości badanych cieczy.

TABELA 2.5
Wybrane właściwości cieczy smarujących wykorzystanych do badania [39]

Ciecz smarująca	Średnia masa cząsteczkowa	Gęstość [kg/m ³]	Temperatura krzepnięcia [°C]	Lepkość kinematyczna [mm ² /s]	
				przy 40°C	przy 100°C
X-1P	1002	1500	-15	224,0	11,2
PFPE	5000	1900	-50	176,2	19,7
L106	254	1150	-50	82,5	10,9
L206	268	1128	-50	88,0	11,8
L208	296	1088	-35	138,1	15,5

Ciecz jonowa oznaczona L106 to tetrafluoroboran 1-metylo-3-heksyloimidazolowy, L206 to tetrafluoroboran 1-etylo-3-heksyloimidazolowy, L208 to tetrafluoroboran 1-etylo-3-oktyloimidazolowy.

W tabeli 2.6 widoczne są wybrane rezultaty badania przeprowadzonego w powietrzu dla różnych materiałów, z jakich wykonano kulkę i dysk. Można zauważyć, że badana ciecz jonowa wykazuje dobre właściwości w trzech opisanych poniżej skojarzeniach materiałów (stali SAE-52100, aluminium Al2024 i miedzi), współczynnik tarcia dla L106, w porównaniu do X-1P i PFPE, jest mniejszy.

TABELA 2.6
Współczynnik tarcia otrzymany w badaniach przeprowadzonych testerem SRV [54]

Ciecz smarująca	Współczynnik tarcia (dla pary kulka/dysk) w powietrzu		
	Stal/stal	Stal/aluminium	Stal/miedź
X-1P	0,098	0,128	0,117
PFPE	0,145	–	0,145
L106	0,065	0,040	0,025

Za pomocą próżniowego testera CZM [7] typu *ball-on-disk* określono wartość współczynnika tarcia dla badanych cieczy jonowych (L106 i L206) w odniesieniu do

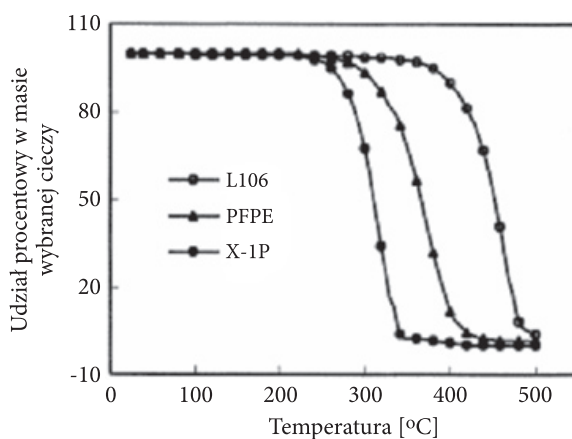
współczynnika tarcia określonego dla perfluoropolietery (PFPE). Badanie odbyło się pod ciśnieniem 10^{-3} Pa i obciążeniem 9,0 N, kulka i dysk zostały wykonane ze stali SAE52100, dysk obracał się z prędkością 500 obr/min. Obie ciecze jonowe wykazały ponad dwa razy mniejszy współczynnik tarcia niż PFPE (tab. 2.7).

TABELA 2.7

Współczynnik tarcia wybranych cieczy smarujących określony na testerze CZM [39]

Ciecz smarująca	L106	L206	PFPE
Współczynnik tarcia	0,070	0,067	0,142

Analiza termogravimetryczna (TGA¹⁰) na aparacie Perkin-Elmer 7 została przeprowadzona, aby ocenić lotność cieczy jonowych. Ubytek procentowy masy był oznaczany ze skokiem co 10°C. Wynika z niej, że ciecz jonowa L106 nie wykazuje ubytków masowych przy temperaturze poniżej 320°C, podczas gdy X-1P i PFPE wykazują ubytki masy kolejno 65,9% i 13,2%. To badanie potwierdza bardzo niską prężność par badanej cieczy jonowej (rys. 2.6).



Rys. 2.6. Wykres ubytku masy w zależności od temperatury dla wybranych cieczy smarujących [39]

Spektroskopia fotoelektronów wzbudzanych promieniami rentgenowskimi (XPS¹¹) posłużyła do oceny składu chemicznego powierzchni podczas procesów tarcia. Badanie zostało przeprowadzone na spektroskopie PHI-5702. Wyniki tego badania potwierdziły tezę mówiącą o tym, że aniony podczas tarcia rozpadają się na fluorki, tlenki azotu,

¹⁰ TGA — z ang. *thermogravimetric analysis*. Analiza ta pozwala na ocenę przemiany termicznej i temperatury, w jakiej zachodzi.

¹¹ XPS — z ang. *X-Ray Photoelectron Spectrometry*.

tlenek boru B_2O_3 , azotek boru BN i $FePO_4$ [53]. To zjawisko zachodzi w powietrzu, a także w próżni, co jest ważniejsze z punktu widzenia misji kosmicznych. Są to substancje chroniące powierzchnie przed zużyciem i obniżające współczynnik tarcia.

Co ciekawe, niektóre cieczy jonowe użyte jako dodatek do cieczy smarującej mogą być bardzo skuteczne w obniżaniu zużycia i współczynnika tarcia, ponieważ już 1% dobranej cieczy jonowej w środku smarnym wystarczy do wytworzenia wyżej wymienionych związków tworzących warstwę chroniącą powierzchnie [4].

Dodatek benzotriazolu do cieczy jonowej poprawia właściwości smarne, a także pełni funkcję inhibitora korozji. Dodatek fosforanu trikretylu (TCP) i dwusiarczku dwubenzylu polepsza właściwości przeciwzużyciowe [4].

Cieczy jonowe posiadają doskonałe właściwości przeciwzużyciowe, redukują współczynnik tarcia, mogą przenosić duże obciążenia, lotność i prężność par cieczy jonowych jest bardzo niska. Te właściwości są zachowane zarówno w powietrzu jak i w próżni. To czyni je doskonałym środkiem smarnym do zastosowania w aplikacjach kosmicznych. Jednak zanim zostaną wykorzystane w praktyce, potrzebne są dokładniejsze badania dotyczące współpracy węzłów tribologicznych i cieczy jonowych.

2.6. Węglowodory krzemowe

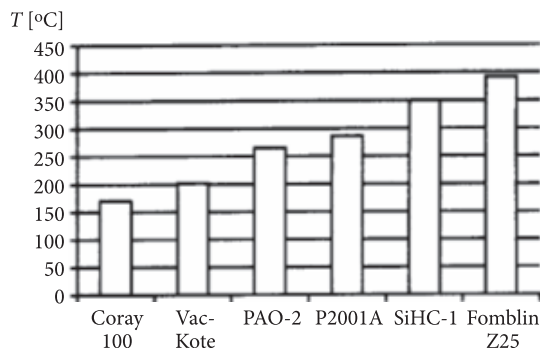
Węglowodory krzemowe (SiHC) to cieczy smarujące, których cząsteczki zawierają jedynie atomy krzemu, węgla i wodoru. Jest to względnie nowa grupa cieczy smarujących, która w przyszłości może znaleźć szerokie zastosowanie w technice kosmicznej. Nie wykazują słabych właściwości podczas tarcia granicznego, tak jak silikony. Węglowodory krzemowe posiadają niską lotność i bardzo szeroki zakres lepkości.

W tabeli 2.8 przedstawiono dokładne wartości lepkości dla przebadanych cieczy i strukturę wybranych węglowodorów krzemowych [26, 27].

TABELA 2.8

Wartości lepkości kinematycznej dla wybranych cieczy smarujących i struktura wybranych węglowodorów krzemowych [26, 27]

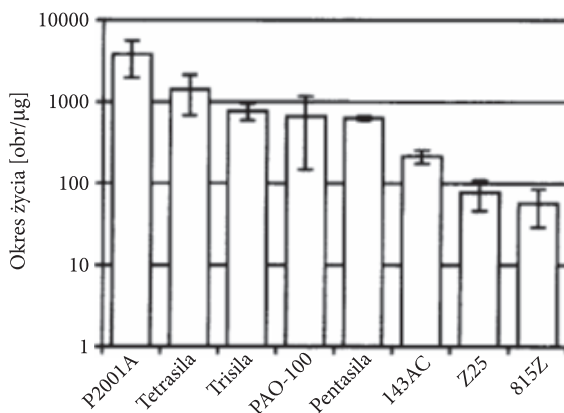
Oznaczenie	Lepkość kinematyczna [cSt]		Wzór sumaryczny	Typ
	w 40°C	w 100°C		
2-94-96	133	20	$(n-C_{12}H_{25})_2Si[C_8H_{16}Si(n-C_{12}H_{25})_3]_2$	Tri
MJD990405	206	31	$Si[C_3H_6Si(n-C_{12}H_{25})_3]_4$	Penta
MJD991029	77	13	$Si[C_3H_6Si(n-C_6H_{13})_3]_4$	Penta
SiHC-3	57	10	$CH_3Si[CH_2CH_2Si-(C_6H_{13})_3]_3$	Tetra
SiHC-2	71	12	$CH_3Si[CH_2CH_2Si-(C_8H_{17})_3]_3$	Tetra
SiHC-1	94	15	$CH_3Si[CH_2CH_2Si-(C_{10}H_{21})_3]_3$	Tetra
6-88-134	105	18	$n-C_8H_{17}Si[C_3H_6Si(n-C_{12}H_{25})_3]_3$	Tetra
Pennzane 2001A	108	15	–	–



Rys. 2.7. Wykres lotności, gdzie T oznacza temperaturę, przy której połowa masy każdej z cieczy poddanych badaniu została utracona [26 za 18]

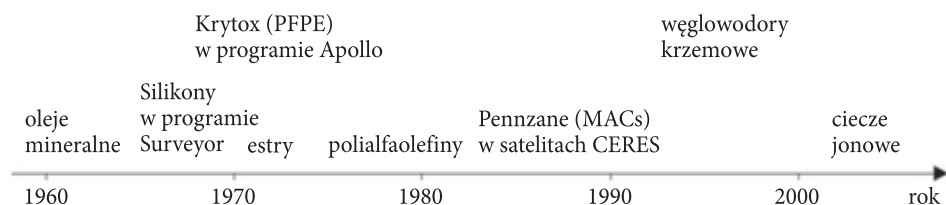
Pomiar lotności za pomocą analizy termogravimetrycznej przy ciśnieniu 33 Pa wykazał, że ubytek badanej cieczy SiHC-1 jest mniejszy niż ubytek P2001A i niewiele większy od ubytku Fomblin Z25. Poprzez T oznaczono na wykresie (rys. 2.7) temperaturę, w której ubytek stanowił połowę początkowej masy badanej cieczy [26 za 18].

Aby określić trwałość tribologiczną badanych cieczy smarujących, wykorzystano aparat SOT (patrz p. 4.1). Przed testem zostało naniesione (wyłącznie na kulkę) około 50 badanej substancji. Test był prowadzony aż do wyczerpania się substancji smarującej lub do gwałtownego wzrostu współczynnika tarcia (do wartości 0,28). Trwałość jest określona przez liczbę obrotów do uszkodzenia podzieloną przez ilość cieczy smarującej na kulce. Test przeprowadzono przy obciążeniu 1,5 GPa, w temperaturze około 23°C, pod ciśnieniem niższym niż 1,3 Pa i prędkości obrotowej 200 obr/min. Test wykazał (rys. 2.8), że węglowodory krzemowe mają dużo większy okres trwałości od stosowanych w technice kosmicznej perfluoropolieterów [26].



Rys. 2.8. Okres życia wybranych cieczy smarujących badanych na aparacie SOT [26]

Na rysunku 2.9 pokazano stopniową ewolucję w dziedzinie wytwarzania i wykorzystywania cieczy smarujących dla techniki kosmicznej. Niektóre z podanych cieczy smarujących obecnie odgrywają niewielką rolę w aplikacjach kosmicznych, inne są często wykorzystywane, a jeszcze inne prawdopodobnie będą szeroko stosowane w przyszłości.



Rys. 2.9. Zarys historyczny prowadzonych badań i prób wdrożenia do techniki kosmicznej kolejnych cieczy smarujących [3, 13, 27, 55, 59, 60]

3. Wymagania stawiane ciecziom smarującym dla techniki kosmicznej

3.1. Lepkość

Lepkość jest jednym z najważniejszych parametrów cieczy smarujących. Zasadniczo odnosi się ją do masy cząsteczkowej cieczy. Znacząco wpływa na wartości innych parametrów. Jedną z ważniejszych zależności jest zmiana lepkości wraz ze zmianą temperatury. Wraz ze wzrostem temperatury maleje lepkość cieczy smarującej. Ta zależność opisywana jest także za pomocą wskaźnika lepkości. Im wyższy jest wskaźnik lepkości, tym lepkość mniej zależy od temperatury, a prosta na wykresie logarytmicznym przedstawiającym zależność lepkości od temperatury jest mniej pochylona (rys. 2.1).

Następną ważną charakterystyką jest zależność lepkości od ciśnienia. Generalnie lepkość wzrasta wraz ze wzrostem ciśnienia. Do wartości 25 MPa przyrost ten jest niewielki. Powyżej tej wartości lepkość zaczyna znacznie wzrastać. Lepkość jest więc wypadkową zależną od wartości temperatury i ciśnienia.

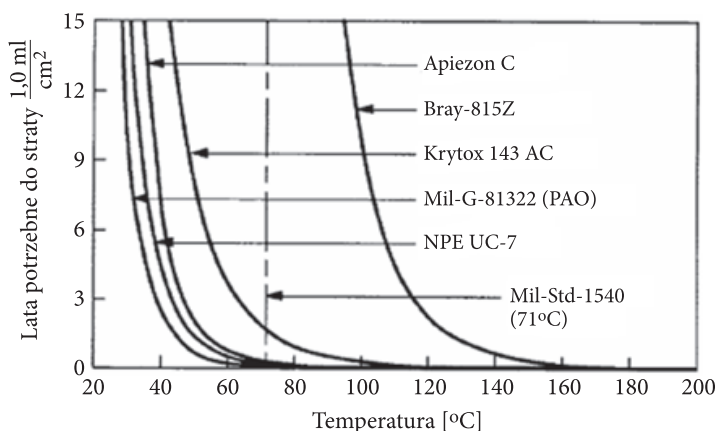
W wielu aplikacjach kosmicznych prędkość obrotowa różnych mechanizmów jest bardzo mała, co wynika z tego, że urządzenia te muszą działać z bardzo dużą precyzją. W takich warunkach występuje zazwyczaj smarowanie graniczne. Należy to mieć na uwadze podczas dobierania cieczy smarujących [36]. Chodzi głównie o optymalizację właściwości lepkościowo-temperaturowych i smarnościami-powierzchniowych.

3.2. Lotność

Lotność to właściwość cieczy smarujących zależna od budowy cząsteczki i rodzaju środka smarnego. W określonym szeregu homologicznym im wyższa masa

cząsteczkowa, tym niższa lotność. Wraz ze wzrostem temperatury wzrasta lotność. Lotność mieszaniny przyjmuje wartość najbardziej lotnego składnika [47].

W próżni pojawia się problem z utraconymi na skutek parowania cząsteczkami, ponieważ w atmosferze powietrza cząsteczki, które odparowały, poprzez odbijanie od innych cząsteczek będących w powietrzu, częściowo powracają do powierzchni, którą opuściły. Natomiast w próżni cząsteczki, które odparowały, nie są odbijane i zostają na stałe utracone. Dlatego należy wybierać ciecz smarującą o jak najniższej wartości prężności par, ponieważ poprzez odpowiedni dobór można ograniczyć ubytki cieczy smarującej [13].



Rys. 3.1. Ubytek na skutek odparowania wybranych cieczy smarujących [9]

3.3. Skraplanie oparów cieczy smarującej

Ciecz smarująca, która została odparowana, ma tendencję do tworzenia chmury dookoła satelity. Na chłodniejszych powierzchniach utworzone opary skraplają się. Niektóre bardzo ważne urządzenia (np. soczewki, lusterka, okna) mogą zostać zanieczyszczone i w rezultacie staną się bezużyteczne. Dla urządzeń, od których wymagana jest niezawodność przez wiele lat, konieczne jest zminimalizowanie powolnego parowania cieczy smarujących [13].

3.4. Termostabilność

Termostabilność jest to odporność na ubytek masowy substancji poprzez ogrzewanie. To podstawowy parametr czystych środków smarnych. Przy ocenie termostabilności określonego związku należy zwrócić uwagę na to, czy ciecz smarująca jest w uszczelnionej przestrzeni, czy w próżni, obecne są gazy (tlen, powietrze lub inne) mogące wywołać reakcję, zapewniona jest obecność obojętnego gazu.

Generalnie prostolańcuchowe węglowodory o krótkim łańcuchu alkilowym są najbardziej termostabilne. Im dłuższy jest łańcuch, tym termostabilność jest mniejsza. Dla węglowodorów syntetycznych nie można łatwo określić parametrów jakie decydują o termostabilności. Można jedynie powiązać termostabilność z siłą wiązań pomiędzy atomami [47].

3.5. Przewodność cieplna

W miejscach, gdzie występuje stan nieważkości, niemożliwe jest chłodzenie poprzez przekazywanie ciepła w materii. Wpływa to negatywnie na pracę stykających się powierzchni, ponieważ generowane jest ciepło, którego odprowadzenie jest utrudnione. Zjawisko to jest bardziej groźne jeżeli środkami smarnymi są ciała stałe. Co nie zmienia faktu, że ciecz smarująca powinna bardzo dobrze odprowadzać ciepło [13, 24].

3.6. Odporność na utlenianie

Jednym z ważniejszych czynników, który powoduje, że środki smarujące przestają spełniać swoje podstawowe funkcje, jest zwykle ich utlenianie. Zanim środek smarny będzie pełnił swoją podstawową funkcję podczas misji, jest on magazynowany na Ziemi, gdzie może mieć kontakt z tlenem cząsteczkowym.

Wpływ na utlenianie może mieć wiele czynników, jednym z nich jest na przykład zmiana temperatury. Kiedy zaczynają pojawiać się rozpuszczalne lub nierozpuszczalne związki, takie jak osady, szlamy, związki kwasowe, to znaczy, że środek smarny przestaje spełniać swoje funkcje i jest to spowodowane przez utlenianie. To zjawisko można głównie poznać po: stopniowym wzroście wartości lepkości cieczy smarującej, wzroście liczby kwasowej, ogólnym zabrudzeniu, pojawieniu się nierozpuszczalnych związków.

Ciecze, które posiadają w swoich cząsteczkach atomy tlenu, są bardziej podatne na utlenianie. Węglowodory z pojedynczymi wiązaniami o prostych łańcuchach są bardziej odporne na utlenianie niż te z podwójnymi i potrójnymi wiązaniami. Im bardziej węglowodór jest reaktywny, tym jego odporność na utlenianie jest mniejsza [47].

3.7. Stan nieważkości

W przestrzeni kosmicznej nie występuje grawitacja. Zjawisko grawitacji występuje na planetach, księżycach i innych ciałach niebieskich. Przyspieszenie ziemskie wynosi około $9,81 \text{ m/s}^2$, dla porównania na Księżycu jest sześć razy mniejsze, a na Marsie około trzy razy mniejsze. Takie różnice powodują, że lądowanie na Marsie i Księżycu jest trudniejsze niż na Ziemi. Wszystkie systemy hydrauliczne,

smarowania, które na Ziemi wykorzystują podczas swojej pracy zjawisko grawitacji, nie spełniają swoich funkcji w stanie nieważkości, ponieważ nie istnieje siła, która przyciągałaby ciecz do miejsca przeznaczenia (np. wlotu pompy lub zbiornika, do którego spływa ciecz smarująca). Jedynie poprzez dobór cieczy smarującej o odpowiednim napięciu powierzchniowym można kontrolować ciecz smarującą w stanie nieważkości [13].

3.8. Absencja reaktywnych substancji w przestrzeni kosmicznej

W kosmosie nie występują reaktywne gazy, brakuje przede wszystkim tlenu w postaci cząsteczkowej. Dlatego w kontakcie z powierzchniami metalicznymi nie tworzą się warstewki tlenków, co znacznie podwyższa współczynnik tarcia. W momencie gdy z powierzchni metalu zostanie starta warstewka wytworzona jeszcze na Ziemi, współczynnik tarcia powiększa się i może dojść do awarii. Brak warstewki tlenków chroniących powierzchnię jest szczególnie odczuwalny, gdy dojdzie do ograniczenia ilości cieczy smarującej.

Ważny jest nie tylko brak reakcji ze smarowaną powierzchnią. Również należy rozważyć wpływ braku tlenu na ciecz smarującą i zawarte w niej związki, dodatki. Nie zostało to jeszcze dokładnie zbadane.

3.9. Oddziaływanie odłamków, pyłu, większych ciał niebieskich

Nie powinno dojść do jakiegokolwiek zanieczyszczenia cieczy smarującej, systemu smarującego pyłami, popiołami z zewnątrz. Należy więc zadbać o odpowiednie zaprojektowanie uszczelnień i połączeń. Uszczelnienia powinny być odporne na oddziaływanie pyłów i popiołów. Również nie powinno dojść do uszkodzeń wywołanych większymi odławkami, meteoroidami. Silne uderzenie ciała obcego w zbiornik cieczy smarującej może spowodować wyciek i awarię smarowanego mechanizmu [13].

3.10. Migracja cieczy smarującej

Zasadniczy wpływ na migrację cieczy smarującej ma jej lepkość. Ciecz o dużej lepkości migruje znacznie wolniej niż ciecz o małej lepkości. Na migrację cieczy ma również wpływ różnica temperatur. Olej przemieszcza się od cieplejszych do chłodniejszych obszarów. Skłonność do migracji cieczy smarujących po powierzchniach łożyska jest większa dla cieczy o niższym napięciu powierzchniowym [13, 30, 49].

3.11. Obecność tlenu atomowego

Na wysokości od około 200 km do 650 km nad powierzchnią Ziemi występuje głównie tlen atomowy. Tlen atomowy jest rodnikiem tlenowym, posiada jeden

niesparowany elektron, dzięki czemu bardzo szybko wchodzi w reakcje z różnymi cząsteczkami. Jednocześnie wzbudzony elektron nie pozwala na utworzenie trwałego związku, uwalnia się i jest gotowy do wejścia w następną reakcję. Wystawienie środków smarnych na działanie tlenu atomowego może prowadzić do ich degradacji. W połączeniu z wysokimi ekstremami temperatur możliwe jest wywołanie reakcji utleniania [37].

3.12. Promieniowanie

Działanie promieniowania ultrafioletowego (UV) i rentgenowskiego (X) może uszkodzić tworzywa sztuczne, elastomery. Uszkodzenia wywołane są przede wszystkim poprzez jonizację i wzbudzanie elektronów. Te zmiany są nieodwracalne, dochodzi do tworzenia wolnych rodników, polimeryzacji, degradacji, wydzielania gazów. Te same uszkodzenia zachodzą, gdy mamy do czynienia z promieniowaniem gamma.

Promieniowanie podczerwone może wywołać degradację termiczną środka smarnego, a degradacja może zostać przyspieszona poprzez połączenie oddziaływań promieniowania ultrafioletowego i podczerwonego.

Poprzez nadmierne promieniowanie może dojść do spadku, a potem do wzrostu lepkości olejów, co może spowodować, że olej będzie „gumowaty” lub stwardnieje. Smary znacznie szybciej ulegają degradacji pod wpływem promieniowania, stają się gęstsze, aż do przemiany w ciało stałe. Pod wpływem promieniowania wzrasta lotność, kwasowość i korozyjność cieczy smarujących, a maleje odporność na utlenianie. Te cieczy smarujące, które są najbardziej odporne na promieniowanie, są także najbardziej termostabilne [6].

3.13. Próżnia

Ciśnienie bezwzględne w przestrzeni kosmicznej wynosi od około 10^{-13} Tr powyżej atmosfery Ziemi do około 10^{-16} Tr w przestrzeni międzygwiazdnej [6].

Stopień odparowania zależy wykładniczo od temperatury. W próżni zmiana temperatury spowodowana wyłącznie promieniowaniem może mieć istotny wpływ na ubytek substancji smarujących.

Ponadto, przy podciśnieniu, jakie panuje w kosmosie i związanym z tym brakiem tlenu, nie dochodzi do odnawiania cienkiej warstewki tlenków, która ochrania powierzchnie węzła tribologicznego. Stąd możliwy jest wzrost współczynnika tarcia [6].

W ostatnich latach powstały nowe cieczy smarujące, które wykazują dobre wyniki w badaniach przeprowadzonych pod bardzo niskim ciśnieniem. Takimi cieczami są węglowodory krzemowe (SiHC), wielokrotnie alkilowane cyklopentany (MACs) i cieczy jonowe (ILs).

4. Metody badań cieczy smarujących dla techniki kosmicznej

Badania tribologiczne cieczy smarujących można podzielić na dwie grupy. Do pierwszej grupy należą badania przeprowadzane w pełnym zakresie działania środka smarnego, przez cały pożądany okres pracy, w warunkach otoczenia, jakie występują dla danego systemu smarowania. Są to badania bardzo wiarygodne, bardzo dobrze odtwarzające warunki występujące w kosmosie. Ich podstawowymi wadami są wysokie koszty i czas trwania. Drugą grupę stanowią badania akcelerowane, opierające się na zwiększaniu prędkości, obciążenia, temperatury tak, aby zasymulować przyspieszoną pracę w krótszym czasie. Są tańsze i mniej czasochłonne niż badania w pełnym zakresie. Posiadają jednak dwie główne wady. Pierwszą z nich jest ich zawilość, ponieważ nie zawsze można łatwo stwierdzić, jakie czynniki zostają zmodyfikowane pod wpływem zmian warunków pracy. Drugą wadą jest możliwość niezamierzonej zmiany rodzaju smarowania, dla którego zaprojektowano mechanizm. Jest to możliwe, ponieważ np. prędkość i obciążenie są zmieniane w tak dużym zakresie, że często znacznie wykraczają poza rzeczywiste wartości występujące podczas zwykłej pracy, do jakiej badany mechanizm jest przeznaczony [33]. W badaniach akcelerowanych należy na to zwracać szczególną uwagę, aby uchronić się przed wyciągnięciem błędnych wniosków.

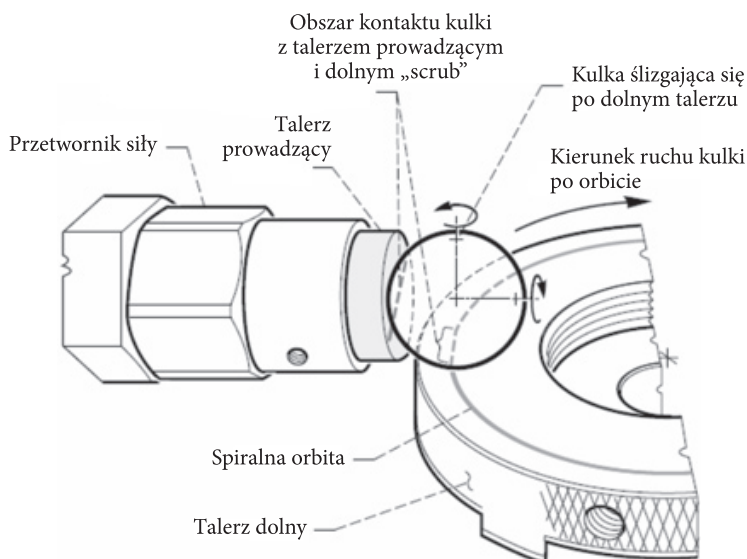
4.1. Aparat SOT

Aparat SOT wiernie odwzorowuje warunki pracy wstępnie obciążonego łożyska kulkowego poprzeczno-wzdłużnego (skośnego) podczas smarowania granicznego. Do przeprowadzenia testu potrzeba jedynie od 50 do 100 μg cieczy smarującej. Taka ilość jest bardzo szybko zużywana i jest to jedyny czynnik, który akceleroje badania przeprowadzane tym aparatem. Inne parametry utrzymywane są na takim samym poziomie jak podczas zwykłej pracy łożyska, a więc niezmienione pozostają wartości: obciążenia, prędkości i temperatury [28, 48].

Obudowa aparatu SOT jest w kształcie sześcianu i została wykonana z nierdzewnej stali. W tak skonstruowanym przyrządzie możliwe jest osiągnięcie ciśnienia poniżej 1,3 Pa. Do uzyskania takiego podciśnienia wykorzystano pompę turbomolekularną. Ciśnienie mierzone jest za pomocą czujnika z zimną katodą. Oprócz testów w próżni, aparat SOT pozwala na badania przy ciśnieniu atmosferycznym przeprowadzone w powietrzu lub w otoczeniu innych gazów.

Na rysunku 4.1 widoczne są szczegóły konstrukcji i zasada działania aparatu SOT. Możliwe jest wykorzystanie standardowych kulek łożyskowych o średnicy 12,7 mm, które są umieszczone pomiędzy dwoma płaskimi talerzami o średnicy 50,8 mm. Talerz dolny jest zamocowany nieruchomo i izolowany od podłoża. Opór elektryczny jest mierzony w dwóch miejscach styku kulki z talerzem dolnym i w miejscu styku kulki z talerzem górnym. Na podstawie pomiaru rezystancji, mierzonej

w miejscach styku kulki z talerzem dolnym i styku kulki z talerzem górnym, można określić stopień odizolowania kulki od talerza osiągany przy pomocy środka smarującego [28]. Górny talerz prowadzi kulkę po spiralnej orbicie o promieniu około 21 mm i może obracać się z maksymalną prędkością obrotową 200 obr/min. Kulka w wyniku toczenia się po spiralnej orbicie wychodzi po spirali ze swojej pierwotnej orbity w kierunku krańca talerza ze średnim skokiem 0,5 mm na obrót. Jeżeli ruch po spirali przebiegałby bez ograniczeń, to kulka wypadłaby z przestrzeni pomiędzy górnym i dolnym talerzem. Dlatego kulka kierowana jest przez pionowo zamocowany talerz prowadzący. Kontakt pomiędzy kulką a talerzem prowadzącym trwa krótko i wystarcza na przywrócenie kulki na jej pierwotną orbitę. Przetwornik sił zamocowany w tym samym uchwycie co talerz prowadzący pozwala na pomiar siły potrzebnej do przesunięcia kulki z powrotem na jej pierwotną orbitę. Dzięki temu pomiarowi można określić wartość współczynnika tarcia.



Rys. 4.1. Schemat budowy i działania aparatu SOT [15]

Substancja smarująca jest umieszczana na kulce poprzez zanurzenie kulki w rozpuszczonej substancji smarującej. Po wyciągnięciu kulki z cieczy należy odczekać aż wyparuje rozpuszczalnik i pozostanie na powierzchni kulki cienki film smarujący. Ilość smaru jest określana przez pomiar masy kulki przed osadzeniem i po osadzeniu substancji smarującej. Zazwyczaj na kulce pozostaje około 50 μg smaru. Talerze nie są smarowane. Za pomocą aparatu SOT możliwe jest także badanie powłok naniesionych na kulki.

Cały proces badania sterowany jest przy pomocy komputera. Należy umieścić talerze w aparacie, kulkę zainstalować pomiędzy talerzami. Ważne jest, aby kulka

dotykała dolnego i górnego talerza, dzięki czemu można uniknąć docierania lub innych zjawisk, które spowodują, że kulka nie dojdzie do talerza prowadzącego. Następnie skojarzenie jest obciążane do pożądanej wartości naprężeń. Test rozpoczyna się, gdy osiągnięte zostanie podciśnienie $1,3 \cdot 10^{-6}$ Pa, a trwa aż do momentu, w którym przekroczona zostanie wcześniej założona wartość współczynnika tarcia, która zazwyczaj wynosi trzykrotność współczynnika tarcia na początku testu.

Okres poprawnej pracy smaru jest definiowany jako liczba obrotów kulki podzielona przez początkową ilość środka smarnego na kulce. Aby uzyskać dobre wyniki, każdy test należy powtórzyć przynajmniej cztery razy [28].

Aparat SOT pozwala na łatwe określenie i ocenę czasu poprawnego działania skojarzeń tribologicznych, wartości współczynnika tarcia, warunków pracy łożyska, degradacji środka smarnego, zmian na powierzchni kulki, analizy ciśnienia i składu gazowego środowiska panującego w komorze podczas przeprowadzania testu [48].

4.2. Próżniowy aparat czterokulowy

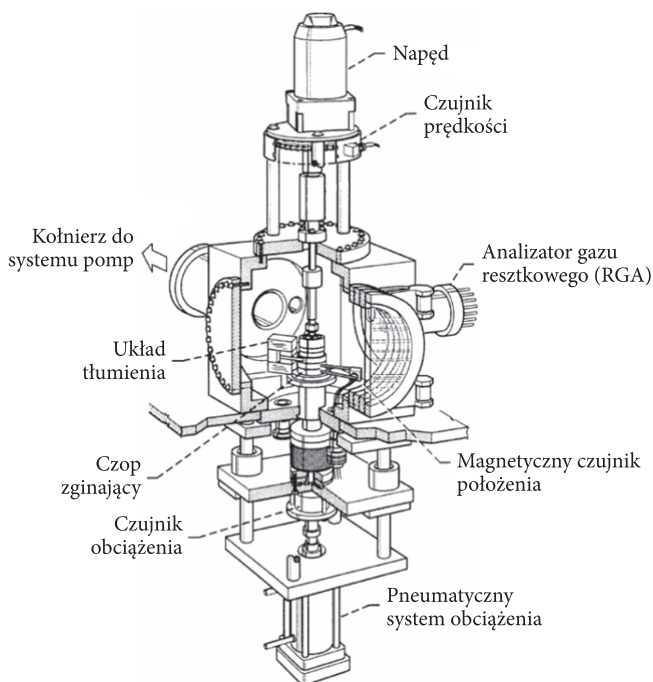
Próżniowy aparat czterokulowy wykonano na podstawie typowego aparatu czterokulowego. Służy głównie do badania właściwości smarnych cieczy smarujących, zużycia powierzchni łożysk zanurzonych w cieczy smarującej, możliwe jest także określenie rodzaju smarowania.

Obciążona górna kulka ślizga się i obraca po trzech unieruchomionych kulkach zanurzonych w cieczy smarującej. Zaletami tego urządzenia są: łatwość obsługi, możliwość testów przeprowadzanych pod wysokimi obciążeniami i wykorzystywanie do testów zwykłych kulek łożyskowych, które są łatwo dostępne [45].

Na rysunku 4.2 widoczna jest budowa próżniowego aparatu czterokulowego. Główne elementy służące do przeprowadzenia badań są podobne jak w zwykłym aparacie czterokulowym. Jednak w szczegółach występują pewne różnice. Dzięki umieszczeniu aparatu w komorze próżniowej badania można wykonywać w wysokiej próżni. Próżnia wytwarzana jest przez turbomolekularną pompę o wydajności 140 l/s i mechaniczną pompę, która jest stosowana do wstępnego opróżniania komory. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe jest uzyskanie podciśnienia o wartości od 10^{-4} Pa do 10^{-6} Pa. Oprócz badań przeprowadzanych pod ciśnieniem istnieje możliwość przeprowadzenia badań w powietrzu lub azocie. Komora próżniowa wyposażona jest w próżniomierz jonizacyjny do pomiaru ciśnienia i analizator gazu resztkowego (RGA) [45].

Obracająca się górna kulka zamocowana jest na trzpieniu obrotowym, trzy dolne kulki umieszczone są niżej w spodku na ciecz smarującą. Spodek zamocowany jest na podstawie. Podstawa może zostać podniesiona do góry za pomocą pneumatycznego systemu obciążenia [45].

Moment obrotowy mierzony jest poprzez pomiar przemieszczenia kąтового spodka na ciecz smarującą z trzema kulkami [45].



Rys. 4.2. Schemat próżniowego aparatu czterokulowego [27 za 31]

Badania można przeprowadzać przy prędkościach obrotowych od 10 obr/min do 500 obr/min w temperaturze, jaka panuje w otoczeniu aparatu.

Przed wykonaniem testu należy wyczyścić kulki, spodek na ciecz smarującą i trzpień obrotowy, na którym zamocowana jest górna kulka. Kulki wykonane ze stali nierdzewnej AISI 440C należy przechowywać w pudełku w atmosferze suchego azotu.

Aby wykonać test, należy napełnić spodek badaną cieczą smarującą, a następnie umieścić w nim trzy kulki. Tak przygotowany spodek z cieczą smarującą i kulkami należy na godzinę umieścić w szklanym słoju i przy pomocy mechanicznej pompy osiągnąć podciśnienie o wartości około 1 Pa. Zabieg ten jest wykonywany w celu pozbycia się rozpuszczonego powietrza z cieczy smarującej.

Następnie spodek umieszcza się na podstawie wewnątrz komory próżniowej i włącza się pompę próżniową. Podciśnienie otrzymane po 10 minutach powinno wynosić około 10 Pa. Jeżeli ten warunek jest spełniony, można włączyć turbomolekularną pompę.

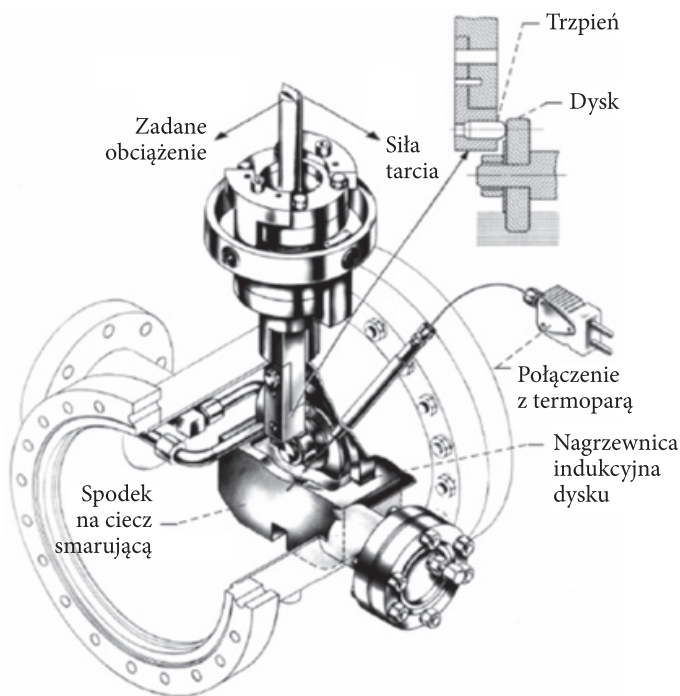
Po osiągnięciu podciśnienia o wartości 10^{-5} Pa lub mniejszego zaczyna się badanie. Moment tarcia jest zapisywany przez cały czas trwania doświadczenia. Zużycie jest oceniane na podstawie pomiaru średnicy śladu zużycia trzech kulek umieszczonych na spodku z cieczą smarującą. Do tego celu wykorzystywany jest

mikroskop optyczny zaprojektowany tak, aby nie było konieczne wyjmowanie kulek ze spodka. Dzięki temu, po przeprowadzeniu pomiarów na mikroskopie optycznym, można dalej kontynuować badania tych samych kulek [45].

4.3. Maszyna tarciowa typu *pin-on-disk* do badań w próżni

Opracowano co najmniej kilka modeli tribometrów typu *pin-on-disk*. Niektóre z nich zostały przeznaczone do badań stałych środków smarnych, inne do cieczy smarujących. Wraz z biegiem czasu i wzrostem wiedzy na temat środowiska panującego w przestrzeni kosmicznej pojawiła się potrzeba stworzenia aparatu, który oprócz badań w atmosferze powietrza umożliwiałby testy przeprowadzane w warunkach podobnych do tych, jakie występują w kosmosie. Dzięki wielu staraniom powstały aparaty typu *pin-on-disk*, które pozwalają na przeprowadzanie badań pod ciśnieniem, w środowisku różnych gazów i w podwyższonej temperaturze.

Głównymi elementami maszyny tarciowej *pin-on-disk* (rys. 4.3) są: trzpień zakończony półkolistą powierzchnią (może to być kulka zamocowana w uchwycie) i płaski dysk, do którego trzpień jest przyciśnięty. Dysk obraca się względem trzpienia. Uchwyty trzpienia posiadają trzy różne długości, aby uzyskać trzy ścieżki zużycia na jednym



Rys. 4.3. Schemat maszyny tarciowej typu *pin-on-disk* ze zbiornikiem na ciecz smarującą w pozycji pionowej [15]

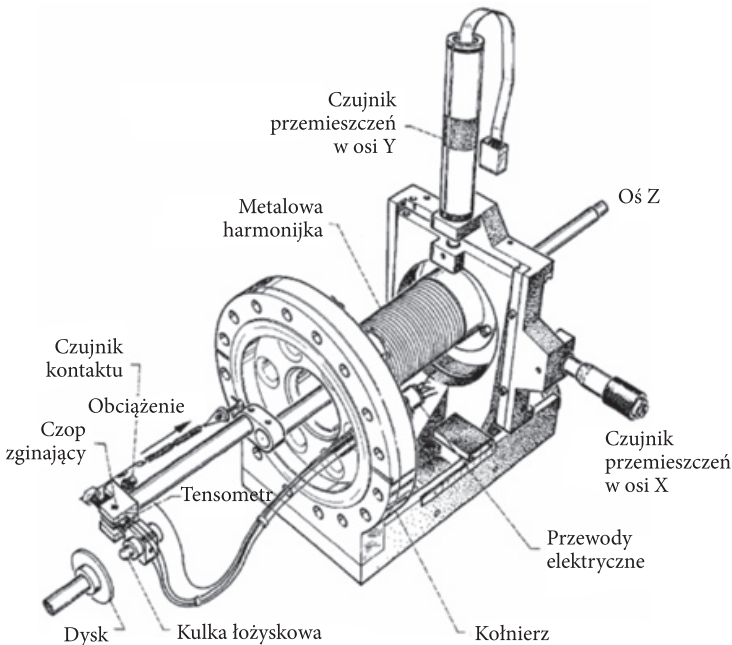
dysku [12]. Zakres prędkości wynosi od 3,6 m/min do 18,2 m/min przy prędkościach obrotowych dysku 25, 50, 75 i 100 obr/min, kiedy używane są trzy uchwyty trzpienia o różnych długościach. Obciążenie przykładane jest poprzez system dźwigni. Przeciętne wartości obciążenia to 0,5 kg lub 1 kg [46]. Dysk może być zanurzony w zbiorniku na ciecz smarującą w pozycji poziomej lub pionowej (rys. 4.3).

Trzpień i dysk powinny posiadać idealnie gładkie powierzchnie, tak aby zredukować zużycie ściernie. Chropowatość powierzchni powinna być mniejsza niż 0,10 μm . Temperatura cieczy jest mierzona przy pomocy termopary. Pomiar siły tarcia odbywa się przy pomocy czujnika tensometrycznego i jest zapisywany na wykresie.

Powierzchnie dolna i górna (lub lewa i prawa) dysku powinny być równoległe, współśrodkowe i płaskie, co zapobiega występowaniu siły bezwładności.

Objętość zużycia materiału trzpienia jest wyznaczana przez pomiar ubytku masy lub zmianę średnicy śladu zużycia i na tej podstawie oblicza się objętość ubytku. Objętość zużycia dysku jest wyznaczana przez pomiar ubytku masy lub przez pomiar ścieżki zużycia w przekroju poprzecznym dysku. Do pomiaru ścieżki zużycia wykorzystywany jest profilometr, a następnie obliczana jest objętość ubytku. Pomiar profilometrem jest preferowany ze względu na przechodzenie materiału z jednego elementu na drugi, co może wprowadzać błędy w pomiarach ubytków masy.

Na rysunku 4.4 przedstawiony jest tester typu *pin-on-disk* do badań w wysokiej próżni. Belka, na której umieszczony jest trzpień, zamocowana jest w próżniowym



Rys. 4.4. Schemat maszyny tarcowej typu *pin-on-disk* przeznaczonej do badań w ultrawysokiej próżni [15]

kołnierzu. Zespół ten jest uszczelniony metalową harmonijką. Tensometr wykonuje pomiary obciążenia i siły tarcia pomiędzy trzpieniem i dyskiem. Do kołnierza przymocowywany jest spektrometr XPS [15].

4.4. Sztuczne sieci neuronowe

Procesy zachodzące w węzłach tribologicznych są bardzo skomplikowane, a modele i stanowiska symulujące określone rodzaje tarcia niedoskonałe. Ze względu na swoje właściwości jednym z ciekawych rozwiązań mogą okazać się sztuczne sieci neuronowe, które opracowano w oparciu o wiedzę na temat neuronowych sieci biologicznych. Sztuczne sieci neuronowe to algorytmy obliczeniowe, które naśladują zachowania komórek ludzkiego mózgu. Mogą nauczyć się analizowania złożonych modeli, nieliniowych procesów, które trudno wytłumaczyć.

Sieci neuronowe mogą zostać wykorzystane do modelowania procesów zachodzących w węzłach tarcia. Wyjątkowo cenną właściwością sztucznych sieci neuronowych jest możliwość wykonywania symulacji dotyczących bardzo długiego czasu pracy badanych mechanizmów w oparciu o dane pochodzące z badań przeprowadzonych w krótkim okresie czasu. Dzięki temu można wyeliminować znakomitą część kosztów poświęconych na długie, żmudne badania. W przypadku misji kosmicznych ma to bardzo duże znaczenie.

Na strukturę sieci składają się połączone ze sobą neurony i to one są odpowiedzialne za przetwarzanie sygnałów wejściowych w wyjściowe.

Uczenie sieci neuronowych polega na wprowadzeniu danych wejściowych i regulacji wartości wag połączeń neuronów aż do uzyskania poprawnych wyników (podobnych do tych otrzymanych w krótkim doświadczeniu). Podczas uczenia się poszczególne wagi będą zmieniać się aż do uzyskania pożądanych wartości wyjściowych. Następnie analizowane są poszczególne wagi pod kątem wpływu na zmienne.

Przydatność sieci jest określana przez umiejętność prawidłowego przewidywania. Można ją łatwo określić dzięki obliczeniu błędów testowych dla wybranego typu sieci [17, 33].

5. Trendy rozwojowe w zakresie smarowania węzłów tribologicznych techniki kosmicznej

5.1. Kierunki rozwoju środków smarnych

Obecnie istnieją ciecze smarujące, które mogą pracować do temperatury 260°C, stałe środki smarne spełniają swoje funkcje do temperatury 1200°C. Stałe środki smarne charakteryzują się wyższym współczynnikiem tarcia i większym

zużyciem elementów węzła tribologicznego w porównaniu do cieczy smarujących [16]. Dlatego potrzebne są ciecze smarujące pracujące w coraz większym zakresie temperatur.

Planowane misje na Marsa i na Księżyc determinują potrzebę dalszych badań cieczy smarujących. Potrzebne są ciecze o bardzo niskiej prężności par, takie jak PFPE, ciecze jonowe, syntetyczne węglowodory. Nowym kierunkiem w dziedzinie doboru cieczy smarującej może okazać się projektowanie cieczy o pożądanych właściwościach. Już dzisiaj poprzez odpowiedni dobór substratów i właściwe prowadzenie reakcji chemicznych możliwe jest uzyskiwanie cieczy jonowych lub wielokrotnie alkilowanych cyklopentanów (MACs) o oczekiwanych parametrach.

5.2. Rozwój badań środków smarnych

Warunki, w jakich środki smarne będą badane, muszą dokładnie odzwierciedlać rzeczywiste środowisko pracy każdej aplikacji. Na Ziemi pewne zjawiska i czynniki występujące w kosmosie są trudne do symulowania.

Stan nieważkości, różne rodzaje promieniowania, atmosfera tlenu atomowego występują na niskiej orbicie okołoziemskiej, ale ich symulacja na Ziemi wymaga jeszcze wielu prób. Także oddziaływania nadmiernych obciążeń i wibracji, do jakich dochodzi podczas startu rakiety w kosmos, są trudne do odwzorowania. Tymczasem mogą one być przyczyną niepoprawnego funkcjonowania systemu smarującego lub drastycznego skrócenia okresu poprawnej pracy. Wskazane jest prowadzenie badań dotyczących procesów degradacji środków smarnych (np. utleniania), która może rozpocząć się jeszcze przed rozpoczęciem misji.

5.3. Technologie smarowania techniki kosmicznej w przyszłości

5.3.1. System smarowania w atmosferze gazów obojętnych

Utlenianie przebiega szybciej przy podwyższonej temperaturze. Co oznacza, że dłuższa praca cieczy smarującej może odbywać się tylko do pewnej temperatury, ponieważ po przekroczeniu pewnej granicy nastąpi przyspieszone utlenianie i ciecz smarująca przestanie spełniać swoją funkcję. Przy znacznym ograniczeniu lub wyeliminowaniu tlenu (zastępując go innym gazem, np. azotem) z otoczenia ciecz smarująca będzie poprawnie spełniać swoje funkcje w temperaturze wyższej niż w atmosferze tlenu. Główną wadą takiego rozwiązania jest potrzeba przechowywania dużej ilości obojętnego gazu (np. azotu) [16, 43]. Należy także rozważyć użycie w tym systemie cieczy smarujących, które dzisiaj są na etapie badań, np. projektowanych celowo cieczy jonowych (TSILs).

5.3.2. Smarowanie mgłą olejową

Poprzez wyeliminowanie gwałtownego mieszania się oleju przy dużych prędkościach obrotowych system smarowania mgłą olejową potrafi znacząco zmniejszyć temperaturę pracy łożysk, ponieważ ciecz smarująca w postaci delikatnej mgły jest wtryskiwana w obszar styku łożyska i zamykana, a po użyciu nie wraca do obiegu. Taki system powoduje, że kontakt cieczy smarującej i łożyska trwa bardzo krótko. Rozkład cieczy smarującej, jaki wtedy może zajść, nie ma większego znaczenia. System smarowania mgłą olejową jest lżejszy i mniej złożony niż system smarowania obiegowego. Istnieje także mniejsze prawdopodobieństwo przypadkowych wycieków i zatykania rozpylaczy lub filtrów [41 za 42]. Ze względu na duże rozmiary zbiorników olejowych system ten nie jest wykorzystywany [16].

5.3.3. Smarowanie drobnoziarnistym proszkiem

Proszki drobnoziarniste, w ściśle określonych warunkach, zachowują się bardzo podobnie jak ciecze smarujące podczas tarcia hydrodynamicznego. Dzięki temu można zastosować to rozwiązanie do smarowania łożysk tocznych i ślizgowych. Proszki mogłyby zostać wykorzystywane do pracy w wyższych temperaturach, w których nie można stosować cieczy smarujących [14 za 21].

5.3.4. Osadzanie oparów cieczy smarującej

Udowodniono, że jako środka smarnego pracującego w wysokich temperaturach można użyć produktów rozkładu cieczy smarującej. Wysoka temperatura powoduje rozkład cieczy smarującej. Oprócz głównych produktów rozkładu, czyli gazów, wytwarzane są stałe produkty rozkładu. Stałe produkty osadzają się na smarowanych powierzchniach i działają w warunkach tarcia granicznego w wysokich temperaturach. Ta technika jest w początkowym stadium rozwoju. Nie została jeszcze w pełni wykorzystana w praktyce [16].

5.3.5. Katalityczne wytwarzanie węgla z fazy gazowej

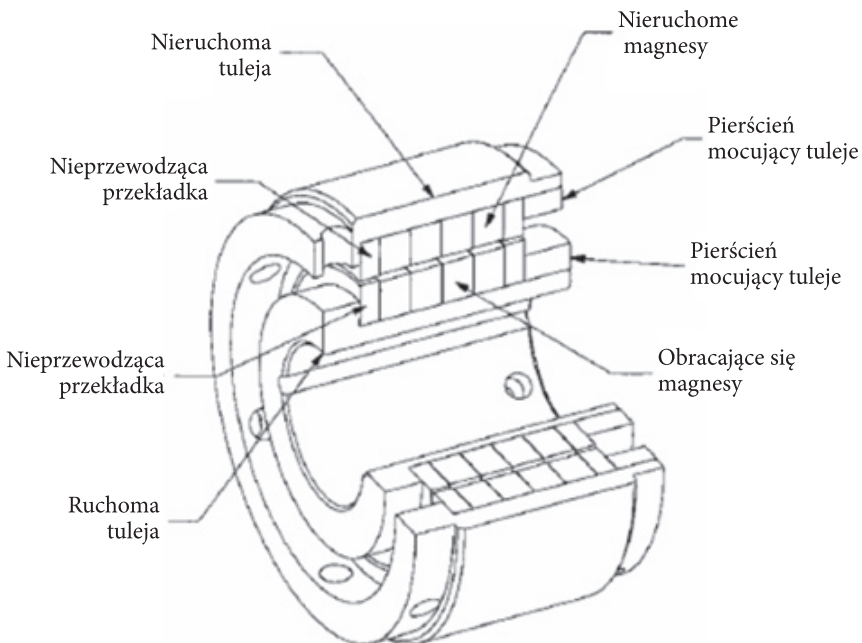
Poprzez wprowadzanie gazów do obszaru pomiędzy dwoma smarowanymi powierzchniami w wysokich temperaturach może zajść reakcja, w wyniku której zostaje utworzony cienki film smarujący. Z przetworzonych gazowych węglowodorów otrzymywany jest węgiel. Taka reakcja może wystąpić, w obecności niklu jako katalizatora, na wielu metalicznych i ceramicznych powierzchniach. Warstewka węgla powoduje zredukowanie tarcia zachodzącego pomiędzy powierzchniami w wysokich temperaturach. Należy przeprowadzić wiele badań potwierdzających skuteczność tego rozwiązania [16 za 38].

5.3.6. Łożyska gazowe

Ciała stałe i ciecze smarujące mogą zostać zastąpione poprzez gaz pod wysokim ciśnieniem. Głównym problemem przy takim rozwiązaniu jest kontakt smarowanych powierzchni na początku i końcu pracy. Dlatego stykające się powierzchnie muszą być od siebie oddzielone, można także zastosować nanoszenie powłok, które będą pełniły rolę środka smarnego na początku i końcu pracy łożyska. Podczas pracy z dużymi prędkościami może dojść do przeciążeń, dlatego konieczne wydaje się zastosowanie powłok ze stałych środków smarnych. Łożyska gazowe mają ograniczoną zdolność do przenoszenia obciążeń. Posiadają jednak potencjał, który po wprowadzeniu udoskonaleń może zostać wykorzystany w przyszłości [16 za 5].

5.3.7. Łożyska magnetyczne

W łożyskach magnetycznych do oddzielenia obu powierzchni wykorzystywane są przeciwstawne pola magnetyczne. Istnieją dwie odmiany łożysk magnetycznych: pasywne i aktywne. Zaletą łożysk aktywnych jest możliwość regulacji pola magnetycznego. Wady łożysk magnetycznych aktywnych to duża ilość oprzyrządowania kontrolnego.



Rys. 5.1. Przekrój pasywnego łożyska magnetycznego [51]

Łożyska magnetyczne pasywne nie potrzebują dużej ilości oprzyrządowania, posiadają potencjał, aby podnieść sprawność i niezawodność łożyska. W łożyskach magnetycznych pasywnych możliwe jest zachowanie większej odległości pomiędzy magnesem stacjonarnym a magnesem obracającym się. Łożyska magnetyczne pasywne mają mniejszą sztywność i gorsze tłumienie w porównaniu do łożysk magnetycznych aktywnych.

Na rysunku 5.1 zamieszczono przekrój łożyska magnetycznego pasywnego. Magnesy stałe zostały osiowo namagnesowane. Jeden magnes przyłączono do tulei obracającej się, a drugi do tulei stacjonarnej. Każdy magnes składa się z czterech pierścieni. Pola magnetyczne obu magnesów powodują, że jeden magnes odpycha drugi [51].

Łożyska magnetyczne nie są szeroko stosowane, ale posiadają duży potencjał. Wraz z szybkim postępem elektroniki może nastąpić wzrost zainteresowania tym rozwiązaniem. Należy także kontynuować pracę nad powłokami, które zabezpieczyłyby powierzchnie magnesów podczas krótkotrwałych kontaktów.

6. Wnioski

Postępujące badania cieczy smarujących dowodzą, że możliwy jest dalszy rozwój niektórych z nich (perfluoropolietery, węglowodory syntetyczne) i zastosowanie nowych cieczy dla techniki kosmicznej (ciecze jonowe, węglowodory krzemowe). Obiecujące są próby projektowania cieczy smarujących o z góry określonych parametrach.

Od cieczy smarujących węzły tribologiczne techniki kosmicznej wymaga się przede wszystkim: coraz niższej prężności par i pracy w coraz szerszym zakresie temperatur i węzłów tribologicznych techniki kosmicznej. Ciągłe istnieje również potrzeba poszukiwań dodatków polepszających właściwości cieczy smarujących.

Istniejące metody badawcze są niedoskonałe. Do dzisiaj niemożliwe jest odwzorowanie wielu czynników występujących w kosmosie (m.in.: stanu nieważkości, atmosfery tlenu atomowego). Trudne jest dokładne określenie (przewidywanie) zużycia węzłów tribologicznych [2]. Dlatego niezbędne są prace polegające na udoskonalaniu obecnych stanowisk badawczych i metod analitycznych oraz tworzeniu nowych metod badań i analizy.

Należy pracować nad wyeliminowaniem wad technik smarowania, które dotychczas nie znalazły praktycznego zastosowania. Techniki te mogłyby rozwiązać wiele problemów dotyczących smarowania w aplikacjach kosmicznych (p. 5.3).

Technika kosmiczna nie zmieniła się znacznie od programu Apollo. Sukcesem tego programu, przeprowadzonego przez Stany Zjednoczone, było pierwsze lądowanie człowieka na Księżycu [57]. Program Apollo dowiódł, że załogowe loty w kosmos wymagają bardzo dużych nakładów. Tymczasem ambitne plany zakładają:

powrót człowieka na Księżyc, próbę zamieszkania na Księżycu, a następnie loty załogowe na Marsa. Takie przedsięwzięcia będą wymagać powstawania i rozwoju nowych technologii, które sprostają warunkom panującym na Księżycu i Marsie. Rozwój technologii potrzebnych do powrotu człowieka na jedyne naturalnego satelity Ziemi i lotu załogowego na czwartą planetę od Słońca musi odbywać się razem z postępem zagadnień związanych z mechaniką i tribologią.

Artykuł wpłynął do redakcji 30.06.2010 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w październiku 2010 r.

LITERATURA

- [1] K. GÓRSKA, W. GÓRSKI, *Materiały pędne i smary*, WKŁ, Warszawa, 1986.
- [2] T. KAŁDOŃSKI, *Tribologia i płyny eksploatacyjne*, Cz. I. Wybrane problemy tribologii, WAT, Warszawa, 1995.
- [3] P. ROŚCISZEWSKI, M. ZIELECKA, *Silikony: właściwości i zastosowanie*, WNT, Warszawa, 2002.
- [4] M. D. BERMUDEZ, A. E. JIMENEZ, J. SANES, J. CARRION, *Ionic liquids as advanced lubricant fluids*, *Molecules*, 14, 8, 2009, 2888-2908.
- [5] B. BHUSHAN, S. GRAY, *Development of surface coatings for air lubricated, compliant journal bearings to 650°C*, *ASLE Transactions*, 23, 2, 1980, 185-196.
- [6] E. E. BISSON, *Friction and bearing problems in the vacuum and radiation environments of space*, *Advanced Bearing Technology*, NASA SP-38, 1965, 259-287.
- [7] H. CHEN, C. DING, P. ZHANG, P. LA, S. W. LEE, *Wear of plasma-sprayed nanostructured zirconia coatings against stainless steel under distilled-water condition*, Elsevier, *Surface and Coatings Technology*, 173, 2-3, 2003, 144-149.
- [8] B. CLARK, *Space exploration technologies*, *Space Mechanisms Technology Workshop Proceedings*, NASA CP-209200, 1999, 103-124.
- [9] P. L. CONLEY, J. J. BOHNER, *Experience with synthetic fluorinated fluid lubricants*, *The 24th Aerospace Mechanisms Symposium*, NASA CP-3062, 1990, s. 213-230.
- [10] L. D. DROMGOLD, E. E. KLAUS, *The physical and chemical characteristics of an homologous series of instrument oils*, *Bearing Conference*, Dartmouth College, Hanover, NH, 1968.
- [11] M. J. DUBE, D. BOLLEA, W. R. JONES, JR., M. MARCHETTI, M. J. JANSEN, *A new synthetic hydrocarbon liquid lubricant for space applications*, *Springer, Tribology Letters*, 15, 1, 2003, 3-8.
- [12] R. L. FUSARO, *How to evaluate solid lubricant films using a pin-on-disk tribometer*, NASA TM-87236, 1986.
- [13] R. L. FUSARO, *Liquid lubrication for space applications*, NASA TM-105198, 1992.
- [14] R. L. FUSARO, *Lubrication of space systems*, NASA TM-106392, 1994.
- [15] R. L. FUSARO, *Preventing spacecraft failures due to tribological problems*, NASA TM-210806, 2001.
- [16] R. L. FUSARO, *Tribology needs for future space and aeronautical systems*, NASA TM-104525, 1991.
- [17] K. GOCMAN, T. KAŁDOŃSKI, *Modeling of moment of friction under increasing load using artificial neural networks*, *European Science Society of Powertrain and transport, Journal of Kones Powertrain and transport*, 14, 2, Warszawa, 2007, 171-177.

- [18] L. J. GSCHWENDER, C. E. SNYDER, JR., M. MASSEY, S. PETERANGELO, *Improved liquid/grease lubricants for space mechanisms*, Lubrication Engineering, 56, 12, 2000, 25-31.
- [19] W. H. GUMPRECHT, *PR-143 — A new class of high-temperature fluids*, ASLE Transactions, 9, 1, 1966, 24-30.
- [20] R. HAGIWARA, Y. ITO, *Room temperature ionic liquids of alkylimidazolium cations and fluoroanions*, Elsevier, Journal of Fluorine Chemistry, 105, 2, 2000, 221-227.
- [21] H. HESHMAT, *The rheology and hydrodynamics of dry powder lubrication*, STLE Transactions, 34, 3, 1991, 433-439.
- [22] M. R. HILTON, P. D. FLEISCHAUER, *Lubricants for high-vacuum applications*, Aerospace Report No. TR-0091 (6945-03)-6, 1993, Springfield, VA, 22161.
- [23] J. G. HUDDLESTON, A. E. VISSER, W. M. REICHERT, H. D. WILLAUER, G. A. BROKER, R. D. ROGERS, *Characterization and comparison of hydrophilic and hydrophobic room temperature ionic liquids incorporating the imidazolium cation*, The Royal Society of Chemistry 2001, Green Chemistry, 3, 2001, 156-164.
- [24] E. JACKSON, *Lubrication in space vehicle*, Elsevier, Wear, 5, 6, 1962, 417-434.
- [25] M. J. JANSEN, W. R. JONES, JR., R. E. PREDMORE, S. L. LOEWENTHAL, *Relative lifetimes of several space liquid lubricants using a vacuum spiral orbit tribometer (SOT)*, NASA TM-210966, 2001.
- [26] W. R. JONES, JR., M. J. JANSEN, L. J. GSCHWENDER, C. E. SNYDER, JR., S. K. SHARMA, R. E. PREDMORE, M. J. DUBE, *The tribological properties of several silahydrocarbons for use in space mechanism*, NASA TM-211196, 2001.
- [27] W. R. JONES, JR., M. J. JANSEN, *Space tribology*, NASA TM-209924, 2000.
- [28] W. R. JONES, JR., S. V. PEPPER, M. J. JANSEN, Q. N. NGUYEN, E. P. KINGSBURY, S. H. LOEWENTHAL, R. E. PREDMORE, *A new apparatus to evaluate lubricants for space applications — the spiral orbit tribometer (SOT)*, NASA TM-209935, 2000.
- [29] W. R. JONES, JR., A. K. POSLOWSKI, B. A. SHOGRIN, P. HERRERA-FIERRO, M. J. JANSEN, *Evaluation of several space lubricants using a vacuum four-ball tribometer*, NASA TM-208654, 1998.
- [30] W. R. JONES, JR., *Properties of perfluoropolyethers for space applications*, NASA TM-106616, 1994.
- [31] W. R. JONES, JR., *Properties of perfluoropolyethers for space applications*, Tribology Transactions, 38, 3, 1995, 557-564.
- [32] W. R. JONES, JR., B. A. SHOGRIN, M. J. JANSEN, *Research on liquid lubricants for space mechanisms*, 32nd Aerospace Mechanisms Symposium, NASA CP-207191, 1998.
- [33] S. P. JONES, R. JANSEN, R. L. FUSARO, *Neural network models of simple mechanical systems illustrating the feasibility of accelerated life testing*, NASA TM-107108, 1996.
- [34] T. J. KAŁDOŃSKI, T. KAŁDOŃSKI, *Lubricity and surface properties of selected imidazolium based ionic liquids*, Proceedings of the International Conference BALTRIB'2009, 21-26.
- [35] T. J. KAŁDOŃSKI, T. KAŁDOŃSKI, C. PAKOWSKI, *The energetic — superficial and lubricity properties of petroleum products and ionic liquids*, European Science Society of Powertrain and Transport, Journal of Kones Powertrain and Transport, 16, 1, 2009, 239-244.
- [36] J. W. KANNEL, K. F. DUFRANE, *Rolling element bearings in space*, The 20th Aerospace Mechanisms Symposium, NASA CP-2423, 1986, 121-132.
- [37] J. W. KANNEL, J. A. LOWRY, K. F. DUFRANE, *Lubricant selection manual*, NASA CR-184363, 1991.
- [38] J. L. LAUER, B. G. BUNTING, *High temperature solid lubrication by catalytically generated carbon*, Tribology Transactions, 31, 3, 1988, 339-350.

- [39] W. LIU, C. YE, Q. GONG, H. WANG, P. WANG, *Tribological performance of room-temperature ionic liquids as lubricant*, Springer Netherlands, Tribology Letters, 13, 2, 2002, 81-85.
- [40] X. LIU, F. ZHOU, Y. LIANG, W. LIU, *Tribological performance of phosphonium based ionic liquids for an aluminum-on-steel system and opinions on lubrication mechanism*, Elsevier, Wear, 261, 10, 2006, 1174-1179.
- [41] W. R. LOOMIS, R. L. FUSARO, *Liquid lubricants for advanced aircraft engines*, NASA TM-104531, 1992.
- [42] W. R. LOOMIS, *Oil-air mist lubrication as an emergency system and as a primary lubrication system*, NASA TM-X-71892, 1976.
- [43] W. R. LOOMIS, D. P. TOWNSEND, R. L. JOHNSON, *Lubricants for inerted lubrication systems in engines for advanced aircraft*, NASA TM-X-52418, 1968.
- [44] M. MASUKO, W. R. JONES, JR., L. S. HELMICK, *Tribological characteristics of perfluoropolyether liquid lubricants under sliding conditions in high vacuum*, NASA TM-106257, 1993.
- [45] M. MASUKO, W. R. JONES, JR., R. JANSEN, B. EBHARA, S. V. PEPPER, L. S. HELMICK, *A vacuum four-ball tribometer to evaluate liquid lubricants for space applications*, NASA TM-106264, 1994.
- [46] K. MIYOSHI, S. V. PEPPER, *Steady-state wear and friction in boundary lubrication studies*, NASA TM-105355, 1992.
- [47] D. H. MORETON, *Liquid lubricants*, Advanced Bearing Technology, NASA SP-38, 1965, 175-203.
- [48] S. V. PEPPER, E. KINGSBURY, B. T. EBHARA, *A rolling element tribometer for the study of liquid lubricants in vacuum*, NASA TP-3629, 1996.
- [49] E. W. ROBERTS, M. J. TODD, *Space and vacuum tribology*, Elsevier, Wear, 136, 1, 1990, 157-167.
- [50] SHOGRIN, A. BRADLEY, W. R. JONES, JR., PILAR HERRERA-FIERRO, TZUHN-YUAN LIN, HAJIMU KAWA, *Evaluation of boundary-enhancement additives for perfluoropolyethers*, NASA TM-107393, 1996.
- [51] M. SIEBERT, B. EBHARA, R. JANSEN, R. L. FUSARO, W. MORALES, A. KASCAK, A. KENNY, *A passive magnetic bearing flywheel*, NASA TM-211159, 2002.
- [52] C. G. VENIER, E. W. CASSERLY, *Multiply-alkylated cyclopentanes (MACs): a new class of synthesized hydrocarbon fluids[®]*, Lubrication Engineering, 47, 7, 1991, 586-591.
- [53] H. WANG, Q. LU, C. YE, W. LIU, Z. CUI, *Friction and wear behaviors of ionic liquid of alkylimidazolium hexafluorophosphates as lubricants for steel/steel contact*, Elsevier, Wear, 256, 1-2, 2004, 44-48.
- [54] C. YE, W. LIU, Y. CHEN, L. YU, *Room-temperature ionic liquids: a novel versatile lubricant*, The Royal Society of Chemistry 2001, Chemcomm Communication, 21, 2001, 2244-2245.
- [55] E. ZARETSKY, *Liquid lubrication in space*, Tribology International, 23, 2, 1990, 75-93.
- [56] M. A. FOWZY, *PFPE, A unique lubricant for a unique application*, Castrol Industrial North America Downers Grove IL, 1998 <http://www.dtic.mil/cgi-in/GetTRDoc?AD=ADA347666&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf> (wejście 6 kwietnia 2010).
- [57] *Multimedialna encyklopedia powszechna, encyklopedia millenium* — edycja 2001, Fogra multimedia, onet.pl.
- [58] *Przemysłowe środki smarne. Poradnik*, Total, Warszawa, 2003, <http://www.elf.com.pl/wiedza/> (wejście 6 kwietnia 2010).
- [59] http://findarticles.com/p/articles/mi_qa3957/is_200006/ai_n8924988/ (wejście 31 maja 2010).
- [60] http://vocuspr.vocus.com/VocusPR30/Newsroom/MultiQuery.aspx?SiteName=DupontNew&Entity=PRAsset&SF_PRAsset_PRAssetID_EQ=112615&XSL=MediaRoomText&PageTitle=Fact%20Sheet&IncludeChildren=true&Cache= (wejście 31 maja 2010).

T. KAŁDOŃSKI, P. P. WOJDYNA

Liquid lubricants for space engineering and methods for their testing

Abstract. This paper presents the analysis of the world source letters [1-60] about liquid lubricants for lubrication of tribological junctions in space engineering. Requirements for liquid lubricants in space applications and research methods for their testing are characterized. The development trends of liquid lubricants for space applications are described, too.

Keywords: tribology, space engineering, liquid lubricants

