

**POLITECHNIKA RZESZOWSKA**  
im. I. ŁUKASIEWICZA  
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa  
Katedra Pojazdów Samochodowych i Inżynierii Transportu

# **ROZPRAWA DOKTORSKA**

mgr inż. Krystian Hadło

**ANALIZA WPŁYWU POWŁOKI A-C:H:W  
ORAZ OLEJÓW SMAROWYCH  
NA PROCESY TRIBOLOGICZNE  
W SMAROWANYCH WĘZŁACH TARCIA**

**PROMOTOR**

dr hab. inż. Janusz Lubas

RZESZÓW 2022



# SPIS TREŚCI

<b>WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ.....</b>	<b>5</b>
<b>1. WPROWADZENIE.....</b>	<b>7</b>
<b>2. ANALIZA LITERATURY.....</b>	<b>9</b>
2.1. Charakterystyka węzłów ciernych.....	9
2.2. Zużycie tribologiczne elementów węzła ciernego.....	11
2.3. Klasyfikacja i charakterystyka olejów silnikowych.....	14
2.4. Technologie stosowane w kształtowaniu węzłów ciernych.....	18
2.5. Skojarzenia tribologiczne z warstwami powierzchniowymi z węglem amorficznym.....	20
2.6. Proces kształtowania warstwy powierzchniowej z węglem amorficznym.....	22
2.7. Właściwości tribologiczne warstw powierzchniowych z węglem amorficznym.....	24
2.8. Podsumowanie przeglądu literatury.....	42
<b>3. CEL, HIPOTEZA NAUKOWA I ZAKRES PRACY.....</b>	<b>45</b>
<b>4. BADANIA WŁASNE.....</b>	<b>47</b>
4.1. Obiekt badań.....	47
4.2. Metodyka badawcza.....	54
4.3. Badania skojarzeń ciernych w styku konforemnym.....	55
4.3.1. Rozruch pary cierniej w styku konforemnym.....	56
4.3.2. Próby pary cierniej w warunkach ustalonej prędkości ślizgania.....	56
4.3.3. Zużycie pary cierniej w skojarzeniu konforemnym.....	57
4.4. Badania skojarzeń ciernych w styku niekonforemnym.....	58
4.4.1. Rozruch pary cierniej w styku niekonforemnym.....	59
4.4.2. Zużycie elementów pary cierniej w styku niekonforemnym.....	59
4.5. Badania właściwości przeciwzatarciowych środków smarowych.....	61
<b>5. WYNIKI BADAŃ I ICH INTERPRETACJA.....</b>	<b>63</b>
5.1. Procesy tribologiczne w węzłach ciernych o styku konforemnym.....	63
5.1.1. Analiza warunków tarcia w parze cierniej.....	63
5.1.2. Zmiany chropowatości warstwy powierzchniowej elementów pary cierniej.....	88
5.2. Procesy tribologiczne w węzłach ciernych o styku niekonforemnym.....	98
5.2.1. Analiza parametrów tarcia pary cierniej.....	98
5.2.2. Ocena stanu warstwy powierzchniowej elementów pary cierniej.....	110
5.2.3. Zmiany chropowatości warstwy powierzchniowej elementów pary cierniej.....	117
5.3. Ocena właściwości przeciwzatarciowych środków smarowych.....	123
5.3.1. Porównanie właściwości przeciwzatarciowych środków smarowych..	127
5.3.2. Ocena stanu warstwy powierzchniowej elementów pary cierniej.....	133
<b>6. PODSUMOWANIE BADAŃ I DYSKUSJA WYNIKÓW.....</b>	<b>138</b>
<b>7. WNIOSKI.....</b>	<b>152</b>
7.1. Proponowane kierunki dalszych prac badawczych.....	155

<b>LITERATURA .....</b>	<b>157</b>
<b>STRESZCZENIE .....</b>	<b>166</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>167</b>
<b>ZAŁĄCZNIKI .....</b>	<b>168</b>
Wykaz rysunków .....	168
Wykaz tabel .....	172

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

a	– przyspieszenie liniowe, $m/s^2$
F	– siła tarcia, $N$
$\mu$	– współczynnik tarcia
$M_t$	– moment tarcia, $Nm$
P	– siła nacisku, $N$
T	– temperatura, $^{\circ}C$
t	– czas, $s$
s	– droga tarcia, $m$
$\Delta m$	– ubytek masowy przeciwpróbki (wycinka panwi), $mg$
n	– prędkość obrotowa, $obr/min$
p	– nacisk jednostkowy, $MPa$
$P_{oz}$	– graniczne obciążenie zatarcia, $N$
$P_t$	– obciążenie zacierające, $N$
$p_{oz}$	– graniczny nacisk zatarcia, $N/mm^2$
CVD	– chemiczne osadzanie z fazy gazowej
PVD	– fizyczne osadzanie z fazy gazowej
HB	– twardość wg skali Brinella
HRC	– twardość wg skali Rockwella
HV	– twardość wg skali Vickersa
Ra	– średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej, $\mu m$
Rz	– największa wysokość chropowatości wg 10 najwyższych profili, $\mu m$
RSm	– średnia szerokość rowków elementów profilu chropowatości, $\mu m$
Rq	– średnie kwadratowe odchylenie profilu, $\mu m$
v	– prędkość ślizgania, $m/s$
ACEA	– Stowarzyszenie Europejskich Producentów Samochodów, <i>Association des Constructeurs Européens d'Automobiles</i>
API	– Amerykański Instytut Naftowy, <i>American Petroleum Institute</i>
ILSAC	– Międzynarodowy Komitet Standaryzacji i Aprobata Środków Smarowych, <i>International Lubricants Standardization and Approval Committee</i>
OECD	– Organizacja Współpracy Gospodarczej i Rozwoju, <i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>
SAE	– Stowarzyszenie Inżynierów Samochodowych, <i>Society of Automotive Engineers</i>



# 1. WPROWADZENIE

W maszynach i urządzeniach współpracujące w węzłach tarcia elementy konstrukcyjne narażone są na ciężkie warunki pracy, takie jak duże i zmienne obciążenie, niedostateczne smarowanie, agresywne środowisko, wysoka temperatura pracy, obecność zanieczyszczeń itp. Trwałość tych elementów zależy głównie od użytych materiałów, metod ich wytwarzania oraz rodzaju zastosowanej obróbki powierzchniowej. Istotnym zagadnieniem we współczesnym świecie jest również redukcja strat energii i ograniczenie zużycia materiałów w węzłach ciernych maszyn i urządzeń. Ograniczenie strat energii podczas pracy wysokoobciążonych elementów maszyn i urządzeń wiąże się również ze zmniejszeniem zanieczyszczenia środowiska naturalnego (mniejsze ilości wykorzystywanych materiałów, spadek ilości generowanych odpadów, płynów, środków smarowych oraz gazów przemysłowych). Wymagania te wymusiły opracowanie nowych materiałów konstrukcyjnych, stworzenie nowych technologii kształtowania warstw powierzchniowych oraz komponowanie środków smarowych dostosowanych do określonych konstrukcji węzłów ciernych i warunków obciążenia.

Eksploatacja węzłów ciernych w warunkach zmiennych wymuszeń tribologicznych jest przyczyną utraty istotnych właściwości użytkowych, a w skrajnych przypadkach powoduje ich zniszczenie. Istotne właściwości tribologiczne zazwyczaj nie zależą od możliwości przenoszenia obciążeń mechanicznych przez cały przekrój elementu, ale głównie od struktury i właściwości warstw powierzchniowych. Powoduje to wytwarzanie nowych rodzajów lub modyfikację istniejących rozwiązań warstw powierzchniowych przeciwozrybiwowych i przeciwtarciowych m.in. poprzez kombinację właściwości konstrukcyjnych, takich jak: wysoka twardość, odporność na ścinanie, zginanie, pękanie oraz dobra adhezja do podłoża. Wśród obecnie stosowanych materiałów szeroko opisywanymi i badanymi są powłoki węglowe, które charakteryzują się korzystnymi właściwościami użytkowymi, pośród których ze względu na procesy tribologiczne najważniejsze to: duża twardość, niski współczynnik tarcia, niski współczynnik rozszerzalności cieplnej oraz odporność na zużycie w warunkach tarcia suchego lub ograniczonego smarowania [1, 2, 3, 4]. Wymagania te w dużej mierze spełnia niskotarciowa powłoka węglowa a-C:H:W, której zaletą jest również proces jej wytwarzania, gdzie temperatura procesu osadzania nie przekracza 250°C. Pozwala to na zachowanie twardości podłoża uzyskanej w poprzednim etapie procesu

technologicznego [5, 6, 7]. Jednak w przypadku powłok niskotarciowych badania wskazują na istotny problem z doбором środka smarowego, gdyż obecnie stosowane opracowane są głównie do stalowych węzłów tarcia. Zastosowanie tych substancji smarujących w węzłach z powłokami węglowymi może w określonych warunkach tarcia być szkodliwe. Wynika to z innych warunków kształtowania filmu smarowego i jest spowodowane odmiennymi właściwościami materiału powłoki niż materiałów stalowych [8].

W niniejszej pracy omówiono aktualny problem badawczy obejmujący wpływ powłoki a-C:H:W ukształtowanej na elementach węzłów ciernych o styku konforemnym i niekonforemnym oraz środka smarowego (syntetycznych olejów silnikowych) na właściwości tribologiczne węzłów ciernych w warunkach ograniczonego smarowania. Jest to szczególnie istotne w zagadnieniach konstrukcyjnych i eksploatacyjnych silników spalinowych, w których dobór odpowiednich technologii kształtowania warstw powierzchniowych (w odniesieniu do kształtu węzła tarcia) i środków smarowych wpływa na trwałość poszczególnych węzłów ciernych, a w efekcie końcowym na trwałość całego silnika spalinowego. Ponadto odpowiednia kompozycja tribologiczna pary ciernej może obniżyć straty energii w bilansie mocy silnika spalinowego spowodowane głównie tarciem współpracujących ze sobą elementów w węzłach ciernych [9, 10].



## 2. ANALIZA LITERATURY

Nieodłącznym zjawiskiem towarzyszącym eksploatacji maszyn jest zjawisko tarcia. Od wielu lat dąży się do ograniczenia negatywnych efektów tarcia, m.in. zużycia współpracujących elementów, emisji ciepła i strat energii.

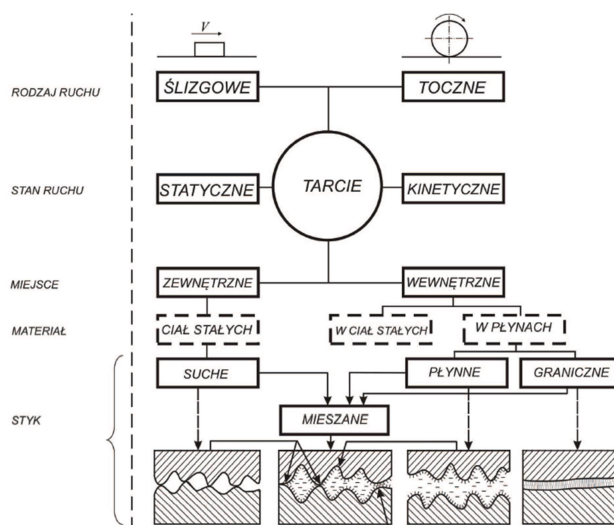
### 2.1. Charakterystyka węzłów ciernych

Zjawiska tarcia, w tym te występujące w silnikach spalinowych można podzielić ze względu na:

- rodzaj ruchu,
- stan ruchu,
- miejsce zachodzenia tarcia,
- rodzaj materiału, w którym zachodzi tarcie,
- styk powierzchni trących.

Procesy tarcia ze względu na styk powierzchni trących dzieli się na [11, 12, 15]:

- tarcie suche,
- tarcie graniczne,
- tarcie płynne,
- tarcie mieszane (rys. 2.1).

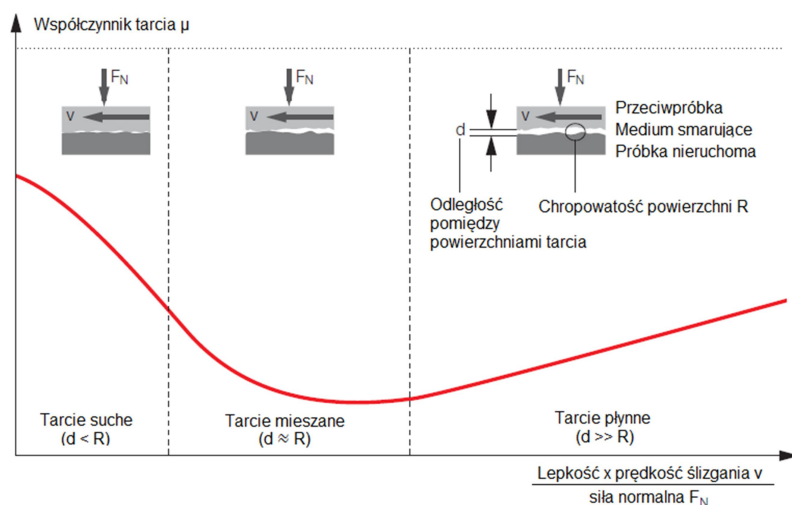


Rysunek 2.1. Kryteria podziału tarcia [11]

Tarcie suche występuje, gdy przemieszczające się względem siebie powierzchnie elementów pary cierniej pozostają w bezpośrednim kontakcie i nie ma pomiędzy nimi środka smarowego. Tarcie płynne obecne jest w parach ciernych, w których powierzchnie współpracujące oddzielone są zupełnie od siebie warstwą środka

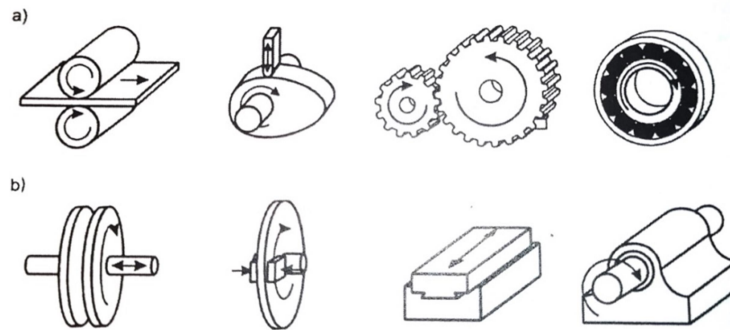
smarowego (np. oleju, smaru). W przypadku, gdy wysokość filmu olejowego zmniejsza się i osiąga wartości porównywalne z wysokością nierówności powierzchni tworzą się warunki do wystąpienia tarcia mieszanego. Tarcie mieszane jest połączeniem tarcia suchego, płynnego i granicznego. W tym stanie obciążenie węzła tarcia może przejmować zarówno substancja smarująca jak i bezpośrednio elementy pary ciernej. Tarcie graniczne jest stadium pośrednim pomiędzy tarciem suchym, mieszanym i płynnym. W tarcu granicznym cienka warstwa zaadsorbowanego przez powierzchnię środka smarowego chroni elementy węzła tarcia przed tarciem suchym.

Zależność pomiędzy współczynnikiem tarcia, lepkością dynamiczną oleju, prędkością ślizgania i siłą nacisku działającą na elementy węzła ciernej obrazuje krzywa Stribeck (rys. 2.2) [7, 12]. Wynika z niej, że wraz ze zwiększaniem prędkości ślizgania współczynnik tarcia maleje, osiągając minimum w momencie przejścia z obszaru tarcia mieszanego w obszar tarcia płynnego [12]. Dalszy wzrost prędkości ślizgania powoduje wzrost tarcia wewnętrznego w warstwie oleju i tym samym wzrost współczynnika tarcia. W nieustalonych warunkach pracy silnika spalinowego, takich jak rozruch, zatrzymanie, restart, praca pod wysokim obciążeniem oraz z niską prędkością obrotową w parach ciernych może występować tarcie mieszane.



Rysunek 2.2. Krzywa Stribeck [7]

Jednym z kryteriów podziału węzłów tribologicznych jest geometria styku powierzchni par ciernych. Wyróżnić można styk konforemny (rozłożony, powierzchniowy) i niekonforemny (liniowy) (rys. 2.3) [13]. W silnikach spalinowych głównym węzłem ciernym tarcia, w którym występuje styk konforemny jest węzeł wał korbowy – łożyska ślizgowe wału korbowego.



Rysunek 2.3. Geometria styku płaszczyzn par ciernych: a) styk niekonforemny (liniowy), b) styk konforemny (rozłożony) [13]

Styk niekonforemny występuje najczęściej w mechanizmie krzywkowym układu rozrządu silnika (para cierna krzywka-popychacz), w układzie wtryskowym silników o zapłonie samoczynnym (układy z pompowtryskiwaczami) oraz w elementach osprzętu silnika spalinowego (m.in. pompy paliwa).

## 2.2. Zużycie tribologiczne elementów węzła ciernego

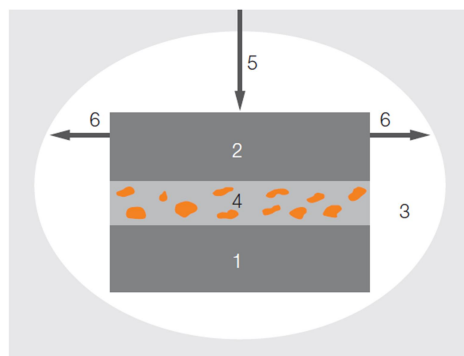
Eksploatacji maszyn i urządzeń towarzyszą procesy zużycia. Wraz z czasem eksploatacji zmieniają się właściwości warstw powierzchniowych współpracujących ze sobą elementów, zwiększają się luzy pomiędzy elementami węzłów ciernych, zmienia się ich kształt oraz chropowatość powierzchni. Dokładność wykonania współpracujących elementów, materiał z których są wykonane oraz sposób smarowania, a także warunki eksploatacji mają decydujący wpływ na ich żywotność, a wynikowo na żywotność całej maszyny. Procesy zużycia charakteryzują się różną intensywnością w zależności od czasu eksploatacji węzłów tarcia. Proces eksploatacji można podzielić na okres docierania, zużycia normalnego i zużycia przyspieszonego, prowadzącego do awarii maszyny (rys. 2.4) [12, 14, 15].



Rysunek 2.4. Etapy eksploatacji maszyn: I – docieranie, II – zużycie normalne, III – zużycie przyspieszone [14]

Elementy pary cierniej wraz z otoczeniem i medium smarującym tworzą system tribologiczny (rys. 2.5) [7, 12, 15]. Zużycie elementów systemu tribologicznego zależy

m.in. od rodzaju styku powierzchni, rodzaju ruchu, obciążenia węzła tarcia, materiałów powierzchni trących, obecności i rodzaju środka smarowego, zanieczyszczeń i produktów zużycia znajdujących się w środku smarowym. Dodatkowo na zużycie wpływają warunki otoczenia węzła tarcia, takie jak temperatura, wilgotność względna, ciśnienie atmosferyczne i inne.



Rysunek 2.5. Model systemu tribologicznego: 1 – próbka nieruchoma, 2 – przeciwpróbka, 3 – otoczenie węzła tarcia (środowisko), 4 – medium smarujące, 5 – obciążenie węzła tarcia, 6 – kierunek ruchu [7]

W parach ciernych można wyróżnić kilka podstawowych mechanizmów zużycia tribologicznego: ściernie, adhezyjne, tribochemiczne, zmęczeniowe, ścierno-korozyjne, wodorowe (rys. 2.6) [11, 12, 15, 16].



Rysunek 2.6. Podział procesów zużycia [12]

Zużycie ściernie (abrazja) jest wynikiem mikroskrwania ostrymi krawędziami nierówności powierzchni lub wywołane obecnością materiału ściernego pomiędzy powierzchniami trącymi, również w medium smarującym. Zużycie ściernie uwydatnia się w przypadku znacznej różnicy twardości i chropowatości współpracujących powierzchni. Abrazja może być widoczna na powierzchni jako rysy, wgłębienia i ubytki materiału [12, 15].

Zużycie adhezyjne powstaje najczęściej w warunkach tarcia suchego lub mieszanego przy kontakcie dwóch powierzchni o zbliżonych właściwościach. W rezultacie dochodzi do zimnego zespawania nierówności powierzchni i przeniesień materiału. Zużycie adhezyjne charakteryzuje powstawanie wżerów i wyrw o ostrych krawędziach [12, 15].

Zużycie tribochemiczne jest wynikiem reakcji zachodzących pomiędzy powierzchniami tarcia i czynnikiem smarującym, w wyniku których na powierzchni tarcia na przemian tworzone i usuwane są warstwy reakcyjne i tlenkowe. Prowadzi to do powstawania ubytków masy materiału pary ciernej i niekorzystnych zmian w strukturze warstwy powierzchniowej [12, 15].

Zużycie zmęczeniowe jest konsekwencją powtarzających się obciążeń mechanicznych lub hydraulicznych powodujących pękanie materiału i propagowanie uszkodzenia w głąb materiału. W przypadku słabo smarowanych węzłów ciernych występuje zjawisko łuszczenia, spowodowane występowaniem mikropęknięć zmęczeniowych. Odmianą zużycia zmęczeniowego jest zużycie gruzełkowe spotykane m.in. w łożyskach tocznych, w których elementy toczne łożyska wtłaczają smar w utworzone na powierzchni pęknięcia powodując uszkodzenie bieżni łożyska [12, 15].

Zużycie ścierno-korozyjne (tribooksydacyjne) jest charakterystyczne dla złączy spoczynkowych oraz elementów wykonujących ruch postępowo-zwrotny o niewielkiej amplitudzie. Tribooksydacja powstaje na skutek cyklicznych obciążeń mechanicznych połączonych z korozyjnym oddziaływaniem środowiska. Mikroprzemieszczenia mogą być wywołane drganiami elementów węzła tarcia lub wynikają z charakterystyki pracy węzła. W wyniku tego rodzaju zużycia dochodzi do niszczenia warstwy powierzchniowej materiału, które widoczne jest jako miejscowe ubytki materiału, naloty tlenków, plamy, pęknięcia lub wyrwania [12, 15]

Mechanizm zużycia wodorowego oparty jest na procesie adsorpcji wodoru na powierzchni elementów par ciernych i następującej dyfuzji w głąb warstwy wierzchniej materiału. Osiągając odpowiednie stężenie w warstwie przypowierzchniowej wodór powoduje zmiany właściwości mechanicznych, fizycznych i eksploatacyjnych materiału, a co za tym idzie powoduje pogorszenie odporności na zużycie [12]. Zużycie wodorowe może być widoczne na powierzchni materiału jako pęknięcia i wykruszenia [15].

W trakcie pracy rzeczywistych węzłów ciernych rzadko występuje tylko jeden rodzaj zużycia tribologicznego. Zazwyczaj jednocześnie pojawia się kilka procesów

zachodzących z różną intensywnością, spośród których można wyróżnić jeden wiodący [11]. Zmniejszenie intensywności zużycia smarowanych par ciernych można osiągnąć poprzez rozwój materiałów konstrukcyjnych i metod kształtowania warstw powierzchniowych oraz doskonalenie środków smarowych [10, 17].

### 2.3. Klasyfikacja i charakterystyka olejów silnikowych

Na trwałość i niezawodność węzłów ciernych w silnikach spalinowych duży wpływ mają zastosowane materiały eksploatacyjne. Środkiem smarowym stosowanym w silnikach spalinowych są oleje silnikowe. Od doboru właściwego oleju silnikowego zależy nie tylko trwałość silnika i jego osprzętu ale również zużycie paliwa i emisja szkodliwych składników spalin [18, 19, 20].

Oleje silnikowe stanowią mieszaninę olejów bazowych oraz kompozycji dodatków uszlachetniających, poprawiających właściwości oleju bazowego. Według klasyfikacji Amerykańskiego Instytutu Naftowego (API) oleje bazowe dzielą się na pięć grup różniących się między sobą składem chemicznym, właściwościami fizycznymi i sposobem otrzymywania (tabela 2.1) [12, 21, 22].

Tabela 2.1. Klasyfikacja olejów bazowych wg API [21, 22]

Grupa oleju bazowego	Indeks lepkości	Węglowodory nasycone [% mas.]		Zawartość siarki [% mas.]
Oleje mineralne				
I	$\geq 80 - < 120$	$< 0\%$	i/lub	$> 0,03\%$
II	$\geq 80 - < 120$	$\geq 90\%$	i	$\leq 0,03\%$
III	$\geq 120$	$\geq 90\%$	i	$\leq 0,03\%$
Oleje syntetyczne i pozostałe				
IV	PAO (Polialfaolefiny)			
V	Wszystkie oleje bazowe nienależące do grup I-IV w tym oleje roślinne			

Do olejów mineralnych, zaliczanych do grup I, II i III klasyfikacji olejów bazowych API należą oleje mineralne konwencjonalne otrzymywane w wyniku rafinacji frakcji węglowodorowych ropy naftowej i niekonwencjonalne, otrzymywane w wodorowych procesach katalitycznych [22]. Grupę IV stanowią oleje PAO, będące kompozycją syntetycznych węglowodorów o strukturze izoparafin. W grupie V znajdują się m.in. estry kwasów karboksylowych, estry kwasu fosforowego oraz estry kwasu krzemowego [22].

W olejach silnikowych stosowane są kompozycje dodatków uszlachetniających, które spełniają określone funkcje i mają za zadanie nadać olejowi pożądane właściwości. Ich udział w gotowym oleju silnikowym może wynosić ponad 20% [12, 22, 23].

Ze względu na funkcję można wyróżnić następujące grupy dodatków do olejów silnikowych [11, 12, 22]:

- dodatki smarnościowe – modyfikatory tarcia, dodatki przeciwwzatarciowe oraz przeciwzużyciowe ograniczające występowanie tarcia granicznego w momencie startu i zatrzymania silnika,
- inhibitory utleniania – zapobiegające zjawisku starzenia oleju,
- inhibitory korozji – ograniczające procesy korozyjne materiałów części silnika mających kontakt z olejem,
- myjąco – dyspergujące – mające za zadanie usuwanie zanieczyszczeń z elementów silnika oraz utrzymanie ich w oleju w formie zawieszonyj i rozproszonej,
- wiskozatory (dodatki lepkościowe) – modyfikujące lepkość oleju w zakresie wysokich temperatur,
- depresatory – obniżające temperaturę krzepnięcia oleju, ułatwiające rozruch w niskich temperaturach,
- dodatki przeciwpienne – zapobiegające pienieniu się oleju.

Klasyfikacje i normy umożliwiają uszeregowanie olejów silnikowych według specyficznych właściwości, ułatwiając ich dobór do konkretnego zastosowania. W praktyce najczęściej spotykane są klasyfikacje olejów silnikowych ze względu na lepkość (klasyfikacja sezonowa SAE) oraz jakość (klasyfikacje API, ILSAC, ACEA, normy wewnętrzne producentów samochodów).

Norma SAE J300 wyróżnia 6 klas zimowych olejów silnikowych z oznaczeniem „W” – 0W, 5W, 10W, 15W, 20W, 25W oraz 8 klas olejów letnich – 8, 12, 16, 20, 30, 40, 50, 60 [25]. W pojazdach samochodowych używane są głównie oleje całoroczne o podwójnym oznaczeniu, np. 5W40, 0W30 itd. Właściwości olejów w niskich temperaturach określa się na podstawie takich parametrów jak: maksymalna lepkość dynamiczna w ujemnej temperaturze pomiaru (pomiar wiskozymetrem CCS), najniższa temperatura pompowności, przy której lepkość oleju wynosi 60000 mPas (pomiar wiskozymetrem MRV) oraz minimalna lepkość kinematyczna w 100°C. Właściwości olejów w wysokich temperaturach ocenia się na podstawie minimalnej i maksymalnej lepkości kinematycznej w 100°C oraz lepkości dynamicznej (HTHS) w 150°C [25]. Oleje wielosezonowe (całoroczne) spełniają zarówno wymagania nisko- jak i wysokotemperaturowe odpowiednich klas SAE.

Równoległe z oznaczeniami klasyfikacji SAE producenci olejów podają oznaczenia dotyczące spełnianych norm jakościowych. Według amerykańskiej klasyfikacji jakościowej API rozróżnia się oleje do silników o zapłonie iskrowym (oznaczenie S) oraz silników o zapłonie samoczynnym (oznaczenie C). Pełne oznaczenie normy składa się z dwóch liter – S lub C, oraz litery odpowiadającej kolejnej wersji normy. Cyfra w oznaczeniu normy odnosi się do cyklu pracy silnika: 2 – silniki dwusuwowe, 4 – silniki czterosuwowe. Aktualnie w użyciu znajdują się normy SJ, SL, SM, SN i SP – oleje do silników o zapłonie iskrowym oraz CH-4, CI-4, CJ-4, CK-4 – oleje do silników o zapłonie samoczynnym. Poszczególne normy dla olejów do silników o zapłonie iskrowym definiują wymagania poprzez szereg testów laboratoryjnych i stanowiskowych mających określić specyficzne właściwości fizyczne badanego oleju. Drugą część wymagań stanowią testy silnikowe, w trakcie których ocenie podlegają m.in. zużycie i zanieczyszczenie elementów silnika badawczego. Normy dla olejów przeznaczonych do silników o zapłonie samoczynnym zawierają osobny zestaw testów laboratoryjnych i silnikowych charakterystyczny dla specyfiki pracy tych silników [21].

Klasyfikacja ILSAC wywodzi się z norm API i określa minimalne wymagania eksploatacyjne obejmujące zarówno testy silnikowe jak i próby stanowiskowe oraz laboratoryjne. Norma zawiera wymagania odnośnie właściwości chemicznych i fizycznych olejów do samochodów osobowych napędzanych benzynowymi silnikami spalinyowymi. Dodatkowo norma skupia się na aspekcie redukcji zużycia paliwa w porównaniu do zużycia paliwa w silniku badawczym smarowanym olejem podstawowym, stanowiącym punkt odniesienia. Obecnie obowiązujące normy GF-6A oraz GF-6B wprowadziły dodatkowe wymagania odnośnie ochrony silnika przed spalaniem stukowym przy niskich prędkościach obrotowych silnika (LSPI), stopnia zużycia łańcucha rozrządu, zapewnienia lepszej ochrony tłoków i turbosprężarek przed tworzeniem się osadów w wysokich temperaturach, ochrony układów oczyszczania spalin oraz ochrony silników zasilanych paliwami zawierającymi etanol, łącznie z paliwami E85 [21].

Klasyfikacja olejów silnikowych wg Stowarzyszenia Europejskich Producentów samochodów ACEA określa wymagania definiujące minimalny poziom jakości środków smarowych do certyfikacji do systemu zarządzania jakością EELQMS oraz prezentacji członkom ACEA. Wymagania odnośnie olejów silnikowych opisane są w trzech dokumentach zawierających wymagania ogólne [26], wymagania dla olejów



do silników samochodów osobowych z silnikami benzynowymi i Diesla oraz silników samochodów osobowych z silnikami benzynowymi i Diesla z systemami oczyszczania spalin [27] oraz silników Diesla stosowanych w samochodach ciężarowych i maszynach roboczych [28]. Nazewnictwo kategorii olejów wg ACEA składa się z oznaczenia literowego i następującej po nim cyfry, która opisuje właściwości olejów dla konkretnych rozwiązań technicznych silników. Regulacja ACEA wyróżnia następujące kategorie olejów do silników benzynowych i Diesla [27]:

- A/B – oleje do silników benzynowych i Diesla o wysokiej zawartości popiołu siarczanowego, fosforu i siarki – „high-SAPS”,
- C – oleje do silników benzynowych i diesla z układami z katalizatorem oraz GPF/DPF o niskiej zawartości popiołu siarczanowego, fosforu i siarki - „low-SAPS”.

Z kolei w regulacji ACEA [28] przedstawiono wymagania dla kategorii E dla olejów do wysokoobciążonych silników Diesla stosowanych w samochodach ciężarowych, autobusach i maszynach roboczych.

W użyciu znajdują się również specyfikacje przygotowane przez producentów samochodów na podstawie własnych badań i testów, zawierające specyficzne wymagania odnośnie olejów do produkowanych silników spalinowych. Dedykowane normy stosują m.in. VW, Fiat, Ford, BMW, Mercedes-Benz, Renault [23].

Część olejów użytych w eksploatacji pojazdów i maszyn jest bezpowrotnie tracona trafiając do środowiska w wyniku zaniedbań eksploatacyjnych, awarii lub nieprawidłowej utylizacji. Zagadnieniem istotnym z punktu widzenia ochrony środowiska jest zdolność oleju do biodegradacji, czyli rozkładu związków chemicznych pod wpływem biologicznego działania organizmów żywych [12, 29]. Pochodne ropy naftowej będące składnikiem bazowych olejów mineralnych są toksyczne i szkodliwe dla środowiska naturalnego, a ich rozkład w środowisku naturalnym jest utrudniony [30]. Bardziej podatne na biodegradację są oleje syntetyczne oraz naturalne – pochodzenia roślinnego i zwierzęcego [12, 31].

Zbiór testów służących do oceny szybkiej biodegradowalności substancji trudno rozpuszczalnych w wodzie, w tym olejów smarowych zawiera norma OECD 301 A-F oraz OECD 310 [32, 33]. W przypadku uzyskania negatywnego wyniku w testach szybkiej biodegradowalności dokonuje się oceny potencjalnej zdolności substancji do biodegradacji wg testów OECD 302 A-C [34, 35, 36]. Jednym ze wskaźników biodegradowalności olejów podawanych przez producentów olejów silnikowych jest biodegradowalność według testu OECD 301B. Test 301B polega na ocenie ilości

wyemitowanego CO<sub>2</sub>, który jest miarą stopnia rozkładu próbki badanej substancji. Większość testów przedstawionych w przewodnikach OECD jest zbieżna z metodami testowymi przedstawionymi w normach PN-EN i PN-EN ISO [31].

Wzrost wymagań stawianych nowoczesnym silnikom spalinowym wymusza specyficzny kierunek rozwoju olejów silnikowych. Przed nowoczesnymi olejami silnikowymi, które od dłuższego czasu są traktowane jako istotny element konstrukcyjny silnika spalinowego stawia się szereg, często sprzecznych ze sobą, wymagań. Wśród tendencji rozwojowych olejów silnikowych najczęściej wymienia się [18, 37]:

- ograniczenie emisji cząstek stałych pochodzących ze spalania oleju silnikowego,
- wzrost udziału olejów typu low-SAPS,
- zwiększenie udziału biodegradowalnych środków smarowych i zwiększenie udziału substancji pochodzących ze źródeł odnawialnych w produkcji olejów bazowych,
- wyższa kompatybilność z biopaliwami,
- zwiększenie zakresu parametrów użytkowych,
- zmniejszenie zużycia paliwa przez silnik (mniejsza lepkość oleju),
- zmniejszenie wartości współczynnika tarcia współpracujących elementów (poprawa sprawności mechanicznej silnika),
- kompatybilność z układami oczyszczania i dodatkowej obróbki spalin,
- zwiększenie przebiegów pomiędzy wymianami oleju, przekładające się na ograniczenie zużycia środków smarowych i korzyści ekonomiczne.

## **2.4. Technologie stosowane w kształtowaniu węzłów ciernych**

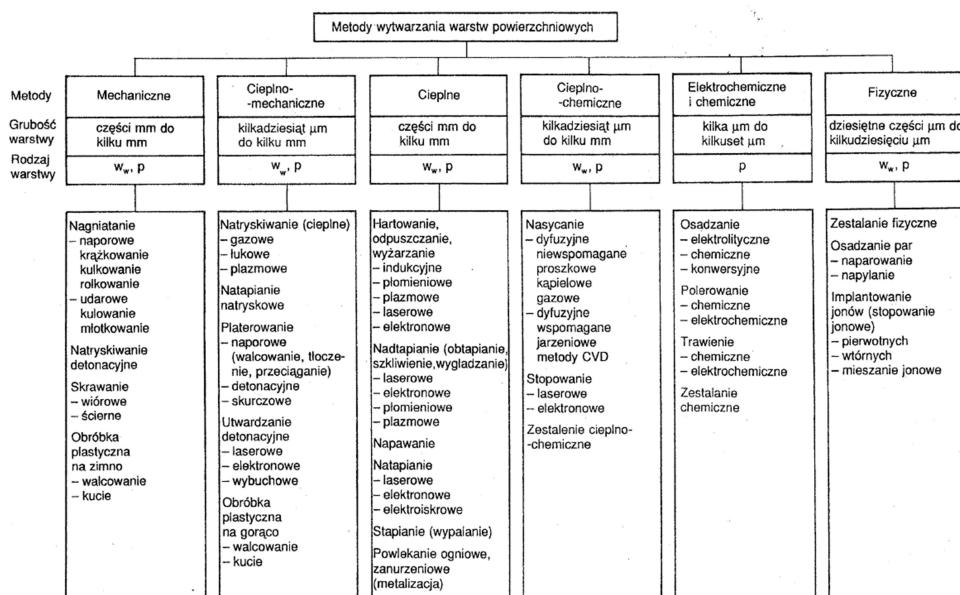
Istniejący od wielu lat trend obniżania pojemności skokowej i liczby cylindrów silników spalinowych (tzw. *downsizing*) przy jednoczesnym zwiększaniu mocy użytecznej spowodował wzrost obciążeń w głównych węzłach tarcia silników spalinowych [20, 38]. Zmienne obciążenia tribologiczne działające na elementy par ciernych powodują stopniowe pogarszanie się właściwości warstw powierzchniowych materiału i przyspieszone zużycie, które może ostatecznie doprowadzić do zniszczenia węzła tarcia. W zagadnieniach projektowania maszyn zazwyczaj nie ma konieczności lub wręcz niekorzystne jest stosowanie materiałów posiadających identyczne właściwości mechaniczne w całym przekroju poprzecznym elementów węzła tarcia. Istotne właściwości tribologiczne zależą w dużym stopniu od właściwości i struktury warstw wierzchnich materiałów węzła tarcia. Rozwój techniki wymusił wprowadzenie

nowych metod wytwarzania lub udoskonalenie istniejących rozwiązań przeciwzuzyciowych i przeciwzatarciowych. Od warstw wierzchnich oraz powłok wymaga się połączenia takich właściwości jak wysoka twardość, odporność na ścinanie, zginanie, pęknięcie oraz dobra przyczepność do podłoża [12, 15, 39, 40].

W praktyce przemysłowej wykorzystywany jest szereg metod kształtowania warstw powierzchniowych. Istotą ich stosowania jest otrzymanie warstwy materiału o określonych właściwościach mechanicznych, wytrzymałości, odporności na czynniki zewnętrzne, zużycie lub podnoszących walory estetyczne.

Metody kształtowania warstw powierzchniowych można podzielić na (rys. 2.7) [16, 39, 40]:

- mechaniczne,
- ciepłno-mechaniczne,
- ciepłne,
- ciepłno-chemiczne,
- chemiczne i elektrochemiczne,
- fizyczne.



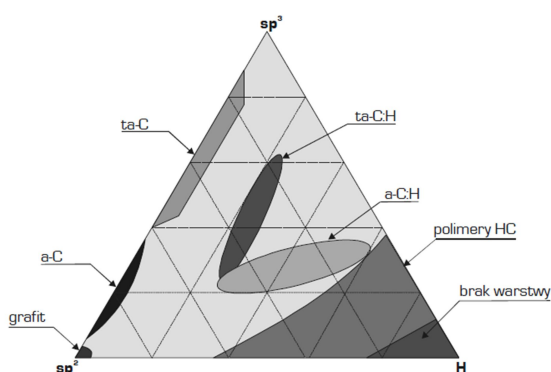
Rysunek 2.7. Klasyfikacja metod wytwarzania warstw powierzchniowych [40]

W ostatnich dziesięcioleciach sukcesywnie rośnie popularność powłok kształtowanych metodami chemicznego osadzania z fazy gazowej CVD oraz fizycznego osadzania z fazy gazowej PVD. Umożliwiają one ukształtowanie jedno- lub wielowarstwowych cienkich powłok przeciwzuzyciowych i ochronnych będących alternatywą lub uzupełnieniem klasycznych metod wytwarzania warstw

powierzchniowych i zaliczane są do grupy procesów wytwórczych przyjaznych dla środowiska naturalnego [7, 39].

## 2.5. Skojarzenia tribologiczne z warstwami powierzchniowymi z węglem amorficznym

Powłoki na bazie amorficznego węgla określane są ogólnie mianem powłok diamentopodobnych DLC (*Diamond-like carbon*). Są one mieszaniną amorficznego węgla o strukturze  $sp^2$  i  $sp^3$ , mogą zawierać wodór oraz domieszki pierwiastków takich jak azot, krzem, chrom, tytan, bor, fluor, wanad i innych. Udział wiązań  $sp^2$  i  $sp^3$  oraz wodoru determinuje typ powłoki DLC (rys. 2.8) [1, 10, 39].



Rysunek 2.8. Podział powłok węglowych ze względu na zawartość wodoru oraz wiązań  $sp^2$  i  $sp^3$  [39]

Powłoki DLC można podzielić na powłoki o strukturze bezwodorowego węgla amorficznego (a-C, ta-C) oraz uwodornionego węgla amorficznego (a-C:H, ta-C:H) bez domieszek. Stosowane są także powłoki z domieszkami o strukturze a-C:Me (a-C:H:Me), w których Me to domieszka metalu lub a-C:X (a-C:H:X) – z domieszką niemetalu [1]. Strukturę powłoki i domieszki dobiera się w zależności od wymaganych właściwości użytkowych powłoki. W celu zapewnienia dobrej przyczepności do materiału podłoża stosowane są również międzywarstwy bazujące na metalach [1, 2, 3].

Powłoki DLC posiadają szereg zalet, m.in. niski współczynnik tarcia ( $\leq 0,2$  w warunkach tarcia suchego), wysoką twardość, są obojętne chemicznie, mają możliwość pracy w warunkach tarcia suchego, posiadają niski współczynnik rozszerzalności cieplnej, wykazują wysoką odporność na zużycie oraz dobre właściwości adhezyjne [1, 2, 3, 4]. Zaletą powłok DLC jest także ich grubość, pozwalająca kształtować je bez konieczności dodatkowej obróbki części w celu zachowania wymiarów i tolerancji węgla ciernego [41].

Powłoki diamentopodobne znalazły szerokie zastosowanie praktyczne. W celu zwiększenia odporności na zużycie powłokami pokrywa się powierzchnie robocze narzędzi i części maszyn. Jako główne zastosowanie wymienia się m.in. elementy toczne i ślizgowe pracujące w warunkach ograniczonego smarowania. Powłoki przeciwdziałają zacieraniu i zużyciu adhezyjnemu i stosowane są na [42, 43]:

- narzędziach skrawających i formujących,
- wysokoobciążonych elementach części maszyn,
- powłoki ochronne dysków twardych,
- elementy cienkowarstwowych czujników (MEMS),
- warstwy dielektryczne,
- elementach protez stawów (zastosowania medyczne).

Powłoki na bazie amorficznego węgla znajdują również coraz szersze zastosowanie w przemyśle samochodowym. Stosuje się je na warstwy powierzchniowe elementów konstrukcyjnych silników spalinowych, takich jak popychacze zaworowe, tłoki, sworznie tłokowe, pierścienie tłokowe, elementy aparatury wtryskowej, sprzęgła i elementy mechanizmów różnicowych [44, 45]. Wśród zastosowań powłok wymieniane są także elementy przedniego zawieszenia teleskopowego motocykli oraz koła zębate [42].

Część energii wytwarzanej w silniku w wyniku spalania paliwa przeznaczana jest na pokonanie strat tarcia w pracujących węzłach ciernych. Szacuje się, że para cierna krzywka - popychacz w układzie rozrządu silnika w zakresie niskich prędkości obrotowych (do 2000 obr/min) i obciążeniach częściowych jest źródłem ok. 20-30% strat tarcia w silniku spalinowym [46]. W artykule [47] oszacowano udział strat układu rozrządu silnika 1,4 HDI w bilansie ogólnym oporów wewnętrznych silnika na 8,4% przy prędkości obrotowej mocy maksymalnej.

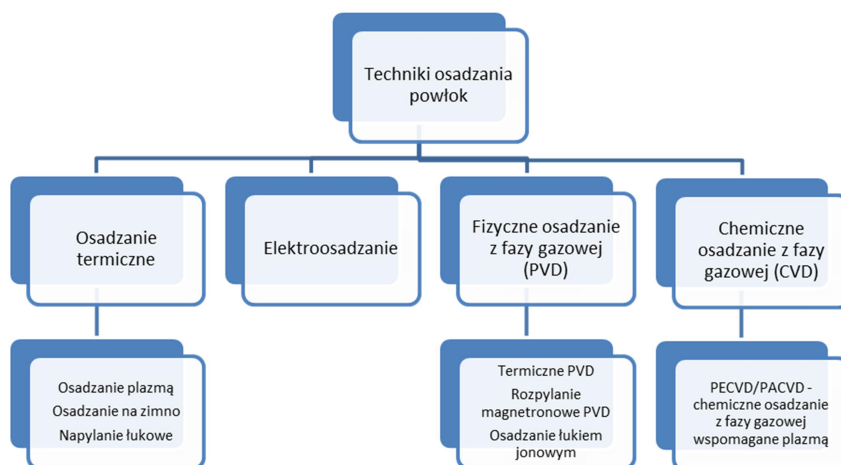
Udział strat mechanicznych generowanych w parze cierniej wał korbowy - łożyska ślizgowe może sięgać ok. 20% strat mechanicznych w bilansie mocy silnika podczas pracy w zakresie średnich i wysokich prędkości obrotowych silnika [48]. Redukcja strat tarcia tych węzłów ciernych może przyczynić się w sposób bezpośredni do ograniczenia zużycia paliwa przez jednostki spalinowe [38].

Spośród powłok węglowych odznaczających się korzystnymi właściwościami tribologicznymi są powłoki domieszkowane wolframem, tj. powłoki a-C:H:W. Należą one do grupy powłok zawierających metale a-C:H:Me. Część autorów na podstawie

badania stanowiskowych wskazuje na ich przydatność w wysokoobciążonych smarowanych węzłach tarcia [45, 49, 50].

## 2.6. Proces kształtowania warstwy powierzchniowej z węglem amorficznym

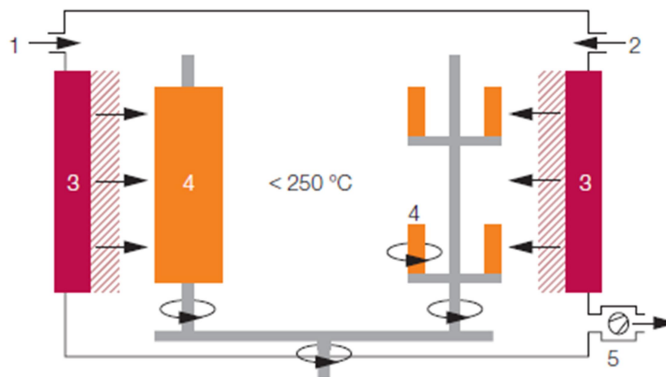
Do kształtowania powłok diamentopodobnych najczęściej stosowanymi metodami są fizyczne osadzanie z fazy gazowej PVD, chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej CVD oraz metody hybrydowe będące połączeniem technik PVD lub CVD z obróbką cieplno-chemiczną [2, 3, 7, 39, 50, 51, 52]. Procesy PVD i CVD mogą być realizowane wieloma technikami, różniącymi się przebiegiem i parametrami procesu, co pozwala na kształtowanie powłok o zróżnicowanych parametrach rys. 2.9 [4].



Rysunek 2.9. Techniki osadzania powłok cienkowarstwowych [4]

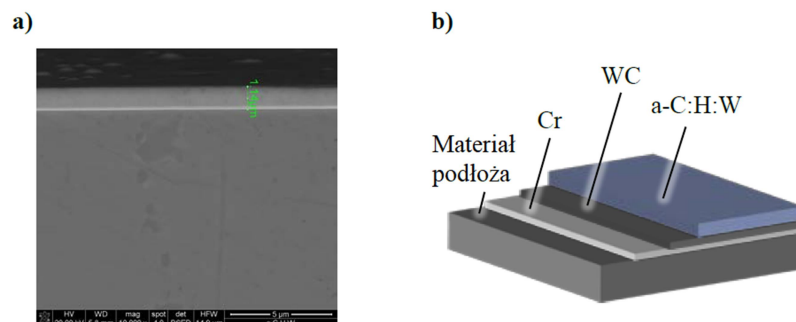
Metodą stosowaną do kształtowania powłoki typu a-C:H:W jest proces PVD. Polega on na naniesieniu na materiał rodzimy cienkiej powłoki na bazie amorficznego węgla, która polepsza właściwości mechaniczne i przeciwkorozyjne warstwy powierzchniowej. Powłoka a-C:H:W nanoszona jest metodą reaktywnego rozpylania magnetronowego (rys. 2.10) [7]. W procesie tym obrobione i oczyszczone elementy umieszcza się na stole obrotowym w komorze podciśnieniowej. Kolejną operacją jest podgrzanie elementów do temperatury roboczej (<math><250^{\circ}\text{C}</math>) i poddanie ich tzw. trawieniu jonowemu za pomocą jonów argonu. W ten sposób zapewnia się powierzchnię wolną od zanieczyszczeń, niezbędną do uzyskania prawidłowej adhezji. Następnie, do źródła rozpylania zawierającego materiał powłoki przykładany jest wysoki ujemny potencjał elektryczny. W efekcie dochodzi do wyładowania gazowego, powodującego formowanie się dodatnich jonów argonu, które przyspieszone w kierunku materiału powłoki (źródła rozpylania) powodują jego odparowanie. Do komory próżniowej

dostarczany jest gaz reaktywny zawierający cząstki niemetaliczne powłoki. Dochodzi do reakcji z uprzednio rozpylonymi cząstkami materiału powłoki. Reakcja ta powoduje utworzenie na detalach cienkiej warstwy powłoki a-C:H:W. Źródłem węgla w powłoce jest gaz reaktywny, zaś materiał powłoki ze źródła odparowania zawiera wolfram. Utworzona powłoka stanowi matrycę węgla i wodoru z wtrąceniami wolframu. W celu zapewnienia jednakowej grubości powłoki a-C:H:W powlekane elementy obracane są ze stałą prędkością w jednej lub kilku osiach na stole obrotowym [7].



Rysunek 2.10. Schemat procesu PVD: 1 – argon, 2 – gaz reaktywny, 3 – źródło materiału powłoki, 4 – detale pokrywane powłoką, 5 – pompa podciśnienia [7]

Powłoka a-C:H:W ma budowę warstwową, w której pod powłoką o strukturze amorficznego węgla z domieszkami wolframu znajduje się warstwa twardego węglika wolframu (WC) oraz warstwa chromu, poprawiająca właściwości adhezyjne do materiału rodzimego (stali) oraz ograniczająca naprężenia wewnętrzne powłoki (rys. 2.11). Międzywarstwa chromu наносzona jest metodą katodowego odparowania łukowego (*cathodic arc deposition, arc-PVD*).



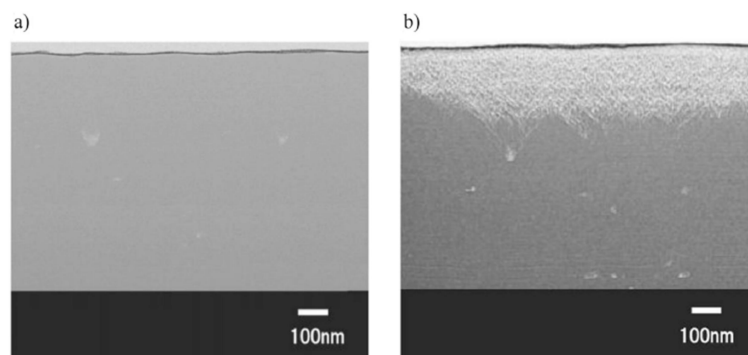
Rysunek 2.11. Budowa powłoki a-C:H:W a) obraz SEM, b) schemat budowy powłoki [2, 53]

Procesy kształtowania powłok węglowych metodą PVD przebiegają w relatywnie niskich temperaturach (<250°C), co pozwala uniknąć osiągnięcia temperatur odpuszczania stali i zmian twardości materiału rodzimego ukształtowanej w poprzednim procesie wytwarzania [5, 6].

## 2.7. Właściwości tribologiczne warstw powierzchniowych z węglem amorficznym

Powłoki węglowe, szeroko opisywane i będące obiektem wielu prac badawczych, charakteryzują korzystne właściwości użytkowe. Mogą one znaleźć zastosowanie m.in. na powierzchniach roboczych smarowanych węzłów ciernych silników spalinowych, przyczyniając się do redukcji współczynnika tarcia i wydłużenia ich żywotności [54].

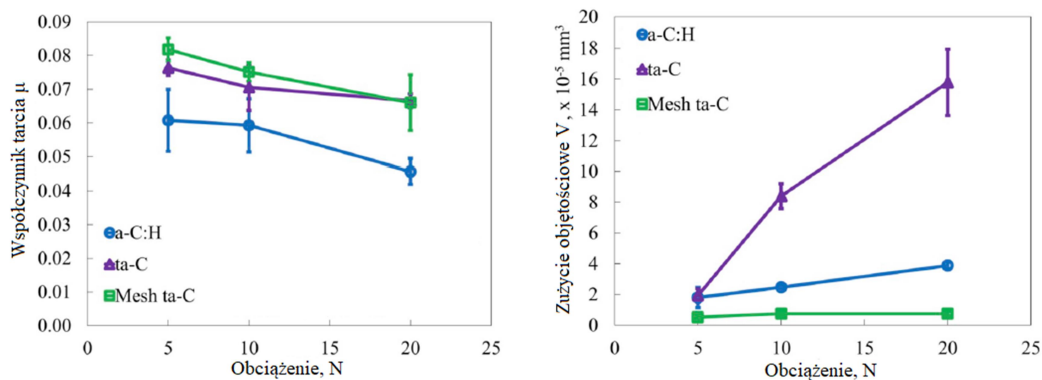
Badania powłok DLC przeprowadzone przez autorów opracowania [55] w warunkach smarowania granicznego w styku rolka - tarcza (*cylindrical pin-on-disc*) wykazały znaczący wpływ rodzaju powłoki DLC na właściwości tribologiczne. Oba elementy badanego skojarzenia ciernego zostały wykonane ze stali SUJ-2 (100Cr6). Na rolkach ukształtowano powłoki a-C:H, ta-C oraz powłokę autorską ta-C o budowie siatkowej (Mesh ta-C) (rys. 2.12).



Rysunek 2.12. Przekrój poprzeczny powłok DLC z transmisyjnego mikroskopu elektronowego (TEM): a) konwencjonalna powłoka ta-C, b) powłoka Mesh ta-C [55]

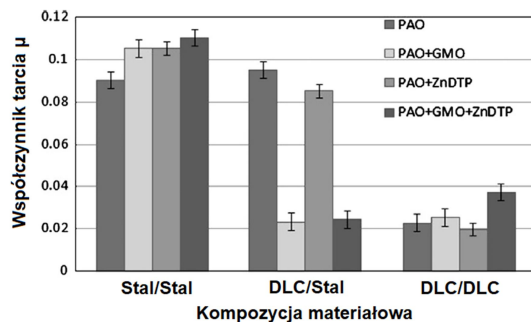
Para cierna pracowała w styku liniowym w obecności oleju bazowego PAO4 pod obciążeniem siłą nacisku  $P=5, 10$  i  $20$  N w czasie  $t=60$  min z prędkością ślizgania  $v=0,068$  m/s. Droga tarcia wyniosła  $250$  m, temperatura pary cierniej  $T=80^{\circ}\text{C}$ . Wraz ze zwiększaniem siły nacisku, autorzy zauważyli spadek wartości współczynnika tarcia w badanych parach ciernych z elementami pokrytymi powłokami a-C:H i ta-C. Zjawisko to przypisują procesowi tworzenia się grafitopodobnej warstwy na powierzchni tarczy stalowej. W przypadku powłoki Mesh ta-C spadek współczynnika tarcia spowodowany był postępującym spadkiem chropowatości powierzchni przeciwpróbki (docieranie powłoki). Biorąc pod uwagę uzyskane przebiegi współczynników tarcia i wartości zużycia objętościowego przeciwpróbek powłoka a-C:H stanowi rozwiązanie pośrednie pomiędzy wielkością oporów ruchu i intensywnością zużycia elementów pracujących w warunkach smarowania granicznego (rys. 2.13) [55].





Rysunek 2.13. Współczynnik tarcia oraz zużycie objętościowe przeciwpróbek pokrytych powłokami a-C:H, ta-C oraz Mesh ta-C [55]

W warunkach smarowania granicznego na właściwości tribologiczne znaczący wpływ ma rodzaj oleju smarującego oraz dodatki uszlachetniające do oleju [56, 57, 58]. W publikacji [57] opisano badania powłoki ta-C o grubości 1,0 i 0,7  $\mu\text{m}$  w warunkach smarowania olejem bazowym PAO4 bez dodatków i z dodatkami uszlachetniającymi w styku rolka (stal S55C) - tarcza (stal SUJ2), w temperaturze oleju  $T=80^\circ\text{C}$ , przy sile obciążającej  $P=5 \text{ N}$  i prędkości ślizgania równej 0,1 m/s. Jako dodatki do oleju zastosowano: GMO - *glycerol monooleate* - monooleinian gliceryny i ZnDTP - *zinc dialkyldithiophosphate* - dialkiloditiofosforan cynku. Badano kompozycje materiałowe rolka - tarcza: stal - stal, DLC - stal, DLC - DLC w czasie obejmującym 10700 cykli ślizgania w styku liniowym.

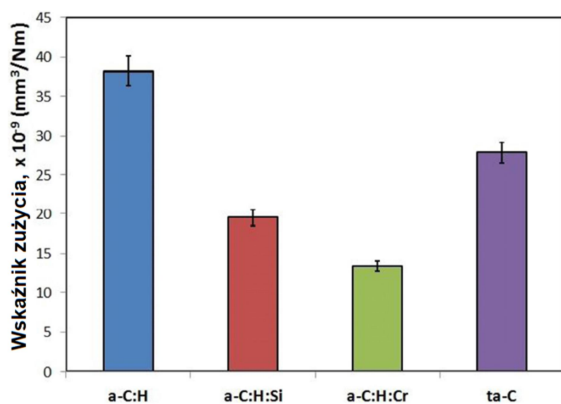


Rysunek 2.14. Współczynnik tarcia w zależności od kompozycji materiałowej i dodatków do oleju bazowego PAO4 w styku rolka-tarcza (po 10700 cyklach) [57]

Zastosowanie powłoki DLC w obszarze tarcia spowodowało istotne zmiany w wartościach współczynnika tarcia rejestrowanych pod koniec prób tribologicznych (rys. 2.14). W przypadku skojarzenia, w którym powłokę naniesiono tylko na powierzchnię rolki zaobserwowano redukcję współczynnika tarcia z wartości 0,08-0,1 do wartości 0,02 przy smarowaniu obszaru tarcia olejem PAO z dodatkiem GMO oraz olejem PAO z dodatkami GMO i ZnDTP. Smarowanie obszaru tarcia olejem bez dodatków powoduje nieznaczny wzrost współczynnika tarcia względem skojarzenia stal

- stal, a sam dodatek ZnDTP do oleju PAO powoduje nieznaczny spadek wartości współczynnika tarcia. Najniższe opory tarcia wystąpiły w skojarzeniu powłoka - powłoka, ponieważ zarówno przy smarowaniu olejem bez dodatków jak i olejem z dodatkiem GMO lub ZnDTP zarejestrowano spadek współczynnika tarcia do wartości  $\mu \approx 0,02$ . W tym skojarzeniu materiałowym najwyższa wartość współczynnika tarcia wystąpiła w parze ciernej smarowanej olejem PAO z kompletem dodatków, tj. GMO i ZnDTP -  $\mu \approx 0,04$ . Zarejestrowano także znaczące różnice w strukturze powierzchni roboczych elementów pary ciernej. Skojarzenia stal - stal noszą wyraźne ślady intensywnego zużycia. Powierzchnie elementów par ciernych w skojarzeniach materiałowych z powłoką DLC zużyły się mniej intensywnie w porównaniu do stalowego wężła tarcia, a poziom zużycia zależy od obecności dodatków uszlachetniających w oleju bazowym [57].

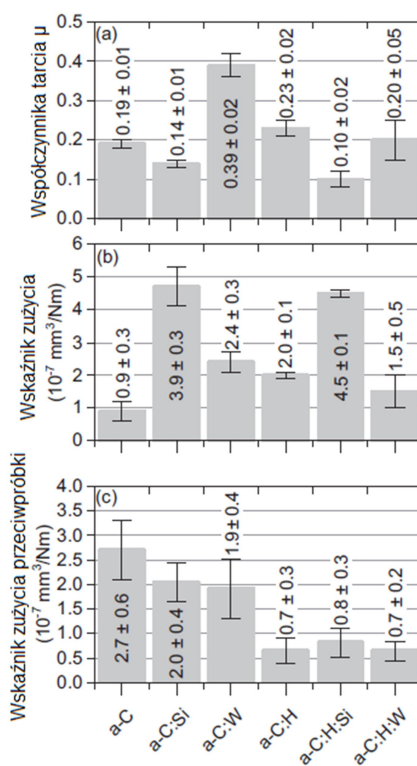
W publikacji [51] badacze Tasdemir, Tokoroyama i in. przedstawili wyniki badań zużycia powłok a-C:H, a-C:H:Si i a-C:H:Cr wytworzonych metodą PECVD oraz ta-C wytworzonej metodą FCVA w styku rolka - tarcza (*pin-on-disc*) w zależności od domieszek w strukturze powłoki. Tarczę jak i rolkę wykonano ze stali łożyskowej SUJ-2. Badania przeprowadzono w warunkach smarowania granicznego olejem bazowym PAO4 bez dodatków uszlachetniających, obciążeniu siłą docisku  $P=5\text{ N}$  i temperaturze  $T=80^\circ\text{C}$ . Powłoka a-C:H po 10700 cyklach ślizgania wykazała najwyższe zużycie, niższe wartości zużycia zmierzono dla powłoki typu ta-C i powłoki zawierającej krzem (a-C:H:Si), natomiast najmniej zużyła się powłoka z domieszką chromu (a-C:H:Cr) (rys. 2.15) [51].



Rysunek 2.15. Wskaźnik zużycia rolek po próbach zużycia w styku rolka-tarcza (skojarzenie materiałowe DLC - DLC) - po 10700 cyklach [51]

Tillmann, Wittig i in. przedstawili wyniki badań tribologicznych w styku kulka - tarcza powłok a-C, a-C:Si, a-C:W oraz a-C:H, a-C:H:Si, a-C:H:W w warunkach tarcia

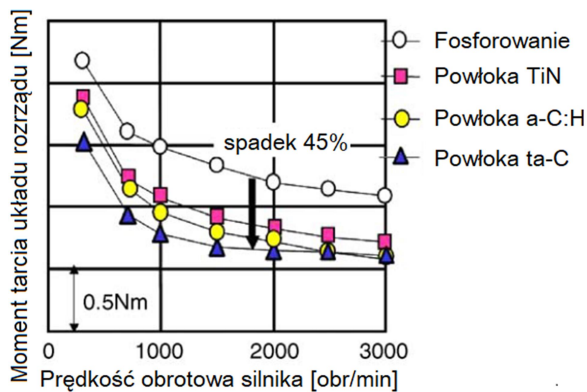
suchego [59]. W badaniach wykorzystano kulki ze stali 100Cr6 (twardość  $11,3 \pm 0,2$  GPa) o średnicy 6 mm oraz tarcze ze stali hartowanej 16MnCr5 o twardości  $8,4 \pm 0,4$  GPa. Test obejmował 5000 cykli ślizgania (obrotów) z prędkością ślizgania  $v=0,4$  m/s i obciążeniem siłą normalną  $P=5$  N. Badania wykonano w temperaturze pokojowej przy wilgotności względnej 40%. Powłoka a-C:H:Si uzyskała w badaniach najniższy współczynnik tarcia równy  $\mu=0,1$ , przy jednoczesnym wysokim zużyciu tarczy równym  $4,5 \times 10^{-7}$  mm<sup>3</sup>/Nm i niskim stopniu zużycia kulki –  $0,8 \times 10^{-7}$  mm<sup>3</sup>/Nm. Powłoka a-C:H:W wykazała 100% wzrost współczynnika tarcia ( $\mu=0,2$ ) względem powłoki a-C:H:Si, przy znacznym ograniczeniu zużycia tarczy ( $1,5 \times 10^{-7}$  mm<sup>3</sup>/Nm) oraz porównywalnym zużyciu kulki badawczej ( $0,7 \times 10^{-7}$  mm<sup>3</sup>/Nm). Wysokie zużycie w przypadku powłok zawierających krzem może być spowodowane tworzeniem się na powierzchni powłoki faz bogatych w SiO<sub>x</sub>, które mogą być usuwane z obszaru tarcia w wyniku ślizgania się przeciwpróbki (rys. 2.16) [59].



Rysunek 2.16. Współczynnik tarcia (a), wskaźnik zużycia tarczy (b) oraz wskaźnik zużycia przeciwpróbki 100Cr6 (kulki) (c) badanych powłok DLC po próbach w styku kulka-tarcza - po 5000 cyklach [59]

W próbach przedstawionych w opracowaniu [46] w styku rolka (stal łożyskowa AISI 52100) - tarcza (stal SCM415) w zakresie prędkości ślizgania  $v=0,03-1$  m/s i obciążeniu siłą  $P=490$  N w warunkach smarowania granicznego najniższe wartości współczynnika tarcia zarejestrowano w parach ciernych z tarczą pokrytą powłoką a-C:H

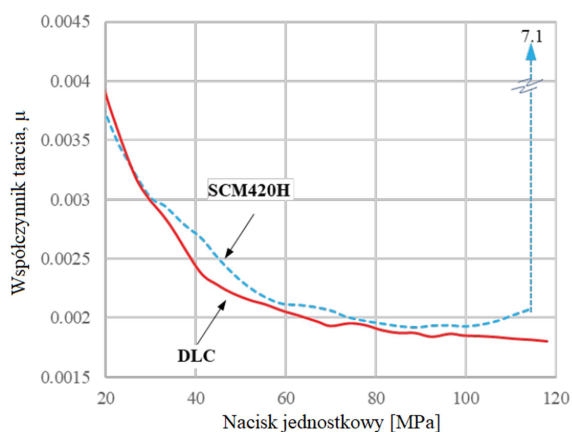
- 0,05-0,11 i powłoką ta-C (0,02-0,1). W warunkach smarowania olejem bazowym PAO z 1% masowym dodatkiem estrów (GMO) zmierzono współczynnik tarcia rzędu 0,006, który był porównywalny do współczynnika występującego przy tarcu tocznym w obecności handlowego oleju silnikowego SAE 5W30. W testach na stanowisku z głowicą silnika spalinowego z wałkiem rozrządu napędzanym silnikiem elektrycznym (układ krzywka - popychacz) smarowanych olejem silnikowym klasy SAE 5W30 API SG przy prędkości obrotowej 2000 obr/min wykazano 45% zmniejszenie momentu tarcia pary cieiernej z popychaczem z powłoką ta-C w porównaniu do popychacza poddanego procesowi fosforowania. Redukcję momentu tarcia wykazał również popychacz z powłoką a-C:H osiągając w całym zakresie prędkości obrotowych niższe wartości momentu w porównaniu do powierzchni pokrytej azotkiem tytanu TiN oraz powierzchni po fosforowaniu (rys. 2.17) [46].



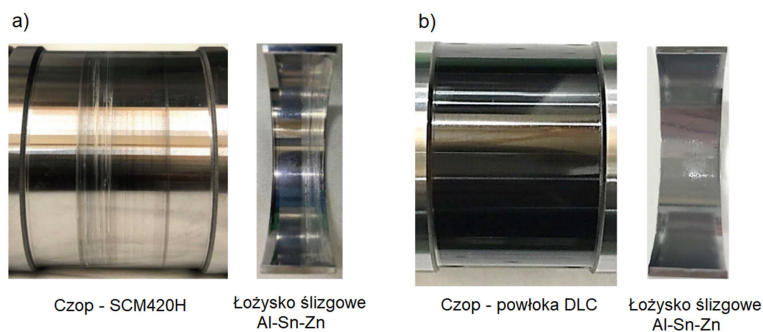
Rysunek 2.17. Moment tarcia w smarowanym węźle cieiernej krzywka - popychacz [46]

Artykuł [48] zawiera wyniki badań stanowiskowych smarowanej pary cieiernej wał - łożysko ślizgowe pracujących w styku rozłożonym naprzemiennie w warunkach tarcia suchego, granicznego i płynnego. Wał wykonano ze stali SCM420H, łożyska zostały wykonane ze stopu Al-Sn-Zn. Powłokę a-C:H:Si o grubości 1  $\mu\text{m}$  naniesiono na powierzchnię czopa wału. Para cieiera pracowała w obecności handlowego oleju silnikowego SAE 0W20 z dodatkiem modyfikatora tarcia MoDTC oraz z dodatkiem EP – ZnDTP. Próby wykonano w warunkach rozpędzania wału od 0 do 5200 obr/min oraz pracy ze stałą prędkością obrotową 5200 obr/min przy rosnącym skokowo obciążeniu wału i temperaturze początkowej oleju 110°C. Para cieiera z czopem bez powłoki a-C:H:Si uległa zatarciu po osiągnięciu nacisków jednostkowych 100 MPa, natomiast para cieiera z czopem z powłoką przepracowała pełen bieg badawczy, osiągając maksymalną wartość nacisków jednostkowych możliwą do uzyskania na stanowisku równą 121 MPa. Autorzy wskazują na niższe wartości współczynnika tarcia w parze

z czopem z powłoką a-C:H:Si, po przekroczeniu nacisków jednostkowych  $\sim 30$  MPa w porównaniu do pary ciernej z czopem bez powłoki. Różnice te sięgają 10% (rys. 2.18). Zastosowanie powłoki DLC w obszarze tarcia spowodowało wzrost odporności na zacieranie wężła tarcia oraz redukcję współczynnika tarcia tej pary ciernej. Na powierzchni czopa wału bez powłoki oraz współpracującego z nim łożyska ślizgowego widoczne są wyraźne ślady zacierania w formie rys, tymczasem powierzchnie robocze elementów pary ciernej z czopem z powłoką DLC wykazują nieznaczne ślady zużycia (rys. 2.19) [48].



Rysunek 2.18. Współczynnik tarcia w parach ciernych z czopem stalowym bez powłoki (SCM420H) i z powłoką a-C:H:Si (DLC), temperatura początkowa 110°C, prędkość obrotowa wału 5200 obr/min [48]

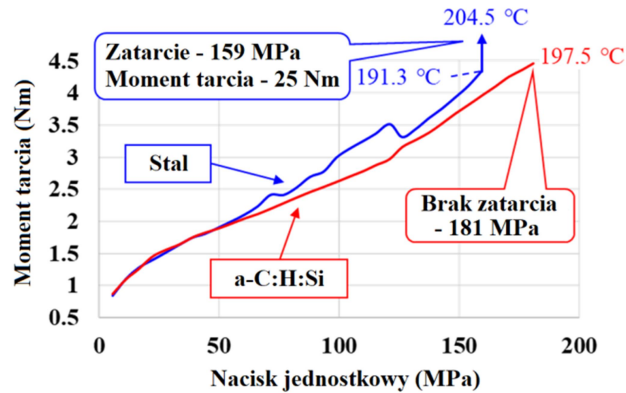


Rysunek 2.19. Powierzchnie czopów wału i współpracujących z nimi łożysk ślizgowych: a) czop stalowy b) czop pokryty powłoką DLC [48]

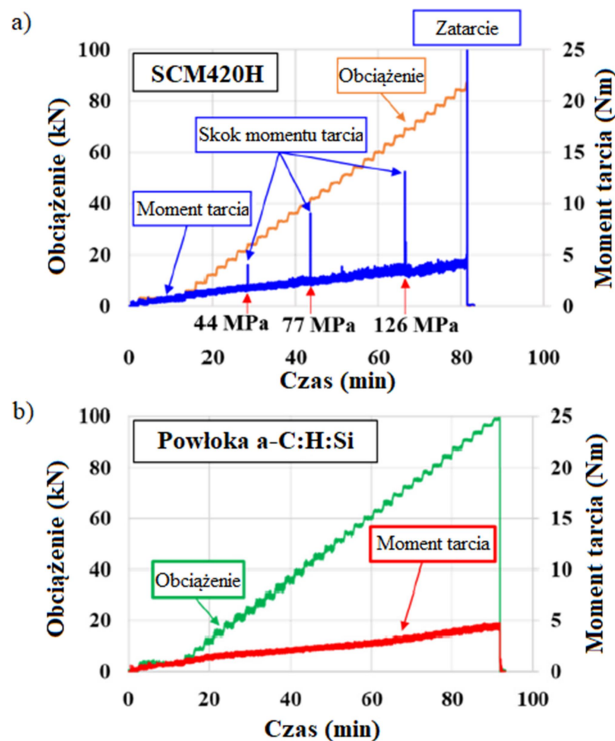
Chropowatość  $R_a$  powierzchni czopa z powłoką DLC w obszarze ślizgania wzrosła po próbach o 8,1% względem czopa bez powłoki, aczkolwiek w obszarze zwiększonego zużycia chropowatość powierzchni czopa z powłoką jest o 81% niższa (rys. 2.20a). Wartości chropowatości  $R_a$  powierzchni roboczej łożyska współpracującego z czopem z powłoką jest o 87% niższa względem chropowatości łożyska po współpracy z czopem bez powłoki i o 95% niższa w obszarach, w których wystąpiło zwiększone zużycie powierzchni (rys. 2.20b). Autorzy zwracają uwagę na



czop wału, olej silnikowy) zgodne ze specyfikacją rzeczywistego silnika spalinowego 2ZR-FXE. W zakresie nacisków jednostkowych powyżej 50 MPa w parze ciernej z powłoką a-C:H:Si otrzymano redukcję wartości współczynnika tarcia rzędu 15% przy naciskach 121 MPa (rys. 2.22).



Rysunek 2.22. Moment tarcia w parach ciernych z czopem stalowym bez powłoki (SCM420H) i z powłoką a-C:H:Si (DLC), prędkość obrotowa wału  $n=5200$  obr/min [60]



Rysunek 2.23. Moment tarcia i obciążenie węzła tarcia w funkcji czasu trwania próby: a) czop stalowy bez powłoki (SCM420H), b) czop z powłoką a-C:H:Si (DLC), prędkość obrotowa wału  $n=5200$  obr/min [60]

W trakcie badań węzła tarcia z czopem bez powłoki okresowo występowały skokowe wzrosty momentu tarcia przy naciskach jednostkowych 44, 77 i 126 MPa świadczące o chwilowym zacieraniu węzła tarcia oraz ostatni wzrost odpowiadający naciskom jednostkowym 159 MPa, skutkujący całkowitym zatarciem pary ciernej

(rys. 2.23a). Temperatura w obszarze tarcia w momencie zatrzymania węzła ciernego wyniosła 204,5°C. Para cierna z czopem wału z powłoką a-C:H:Si nie uległa zatarciu podczas prób osiągając wartość nacisków jednostkowych równą 181 MPa i temperaturę 197,5°C (rys. 2.22 - 2.23b) [60].

Autorzy Madej, Ozimina i Pająk w pracy [52] przedstawili wyniki badań powłoki a-C:H:W z międzywarstwą TiN (TiN/a-C:H:W) w styku kulka - tarcza oraz trzpień - płytką. Tarcze i trzpienie wykonano ze stali HS6-5-2C, zaś kulki do badań ze stali 100Cr6. Powłoki zostały naniesione na tarcze oraz trzpienie. Testy przeprowadzono w warunkach braku smarowania oraz smarowania syntetycznym olejem bazowym PAO8. Zużycie par ciernych zarówno w warunkach tarcia suchego jak i smarowania olejem polialfaolefinowym PAO8 jest niższe w przypadku próbek pokrytych powłoką TiN/a-C:H:W w porównaniu do próbek bez powłoki. Badania korozyjne wykazały wyższą odporność na korozję elementów z powłoką DLC w porównaniu do elementów stalowych nie pokrytych powłoką w badanych skojarzeniach ciernych [52].

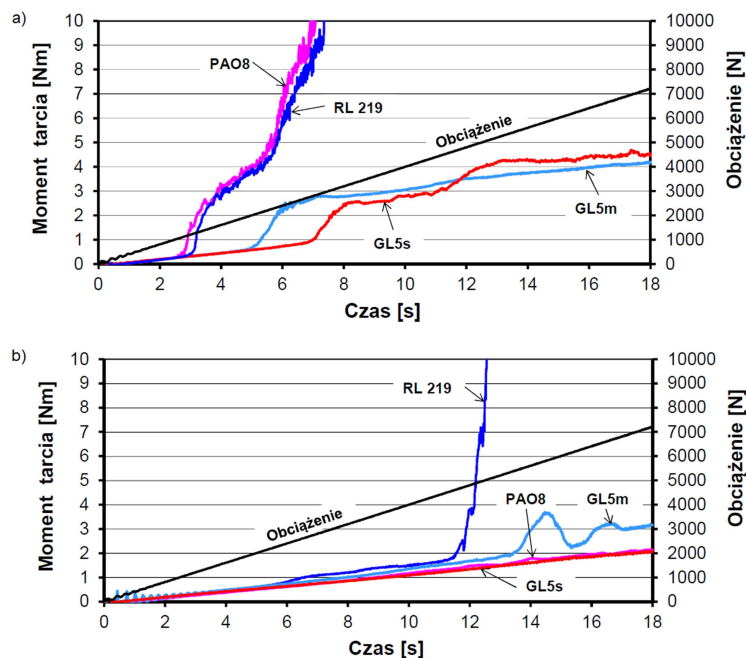
W publikacji [61] wymienieni wyżej autorzy przedstawiają wyniki badań tej samej powłoki (TiN/a-C:H:W) w identycznych warunkach tarcia ( $P=10$  N,  $v=0,1$  m/s,  $s=1000$  m) przy użyciu do smarowania węzła tarcia kulka - tarcza cieczy jonowych (ciecz fosfoniowa, ciecz imidazoliowa). Ciecze jonowe przedstawiane są jako przyszłościowa alternatywa dla mineralnych i syntetycznych środków smarowych. W trakcie prób uzyskano wartości współczynnika tarcia, wynoszące odpowiednio dla cieczy fosfoniowej 0,01, a dla cieczy imidazoliowej 0,02. Są to wartości niższe niż uzyskane w publikacji [52], ponieważ analogiczna para cierna smarowana olejem PAO8 uzyskała wartość ok. 0,06. Uzyskane wartości zużycia par ciernych smarowanych cieczami jonowymi na drodze tarcia  $s=1000$  m oscylują w granicach 10-12  $\mu\text{m}$ , podczas, gdy skojarzenie pracujące w obecności oleju PAO8 wykazało zużycie na poziomie 7  $\mu\text{m}$  [52]. Współczynnik tarcia w trakcie prób w warunkach tarcia suchego w skojarzeniu stal 100Cr6 (kulka) - stal HS6-5-2C (tarcza) pod koniec prób wyniósł ok. 0,5, podczas gdy w skojarzeniu z tarczą z powłoką współczynnik tarcia spadł do wartości ok. 0,2. Autorzy wskazują na przejście przez powłokę funkcji dodatków przeciwwzartarciowych w przypadku wystąpienia tarcia suchego w węzle ciernym [61].

Kontynuację badań nad powłokami DLC smarowanych cieczami jonowymi przedstawiono w publikacji [62]. Zachowując parametry pracy tribotestera z publikacji [52] oraz [61] zbadano zachowanie powłok a-C:H i a-C:H:Si naniesionych na tarcze ze stali 100Cr6 w warunkach tarcia technicznie suchego, smarowania imidazoliową cieczą



jonową oraz olejem bazowym PAO8. Jako punkt odniesienia przyjęto skojarzenie cienne kulka 100Cr6 - tarcza 100Cr6 bez powłoki. W warunkach tarcia technicznie suchego najwyższy współczynnik tarcia zarejestrowano w skojarzeniu materiałowym stal - stal – 0,7, następnie stal - powłoka a-C:H-Si – 0,15 i a-C:H – 0,13. Wprowadzenie w obszar tarcia medium smarującego spowodowało znaczny spadek współczynnika tarcia w skojarzeniu stal - stal do wartości 0,12 (olej PAO8) i 0,11 (ciecz jonowa). W przypadku tarczy z powłoką a-C:H wartości wyniosły 0,09 dla oleju PAO8 i 0,05 dla cieczy jonowej. W skojarzeniu z powłoką a-C:H:Si wartości te wyniosły odpowiednio 0,13 i 0,09 [62].

Podobne wnioski odnośnie właściwości samosmarujących powłoki przedstawiono w publikacjach [49, 50] podsumowując badania na tribotesterze T02U skojarzenia cierne z powłoką a-C:H:W w obecności oleju PAO8, rafinowanego oleju rzepakowego, mineralnego oleju bazowego RL219 i olejów przekładniowych klasy GL5 – na bazie mineralnej i syntetycznej. Podczas badań uzyskano poprawę charakterystyk zacierania węzłów tarcia smarowanych olejem roślinnym i olejem GL5 na bazie mineralnej.

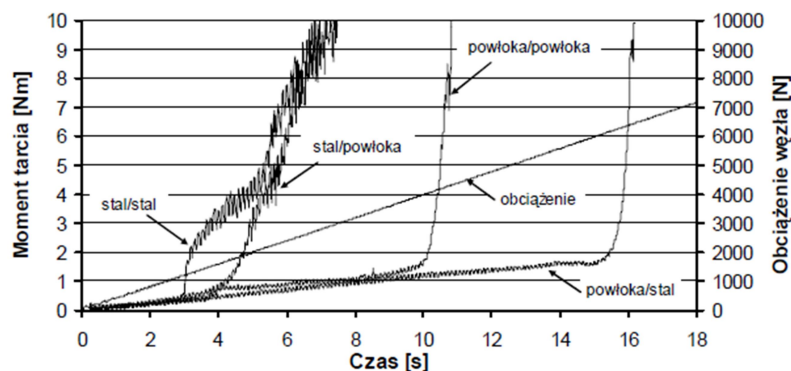


Rysunek 2.24. Moment tarcia w styku czterokulowym w skojarzeniu materiałowym: a) stal 100Cr6/stal 100CR6, b) powłoka a-C:H:W/stal 100Cr6; temperatura początkowa 23°C [50]

Istotne zmiany w przebiegu charakterystyk zacierania wystąpiły podczas smarowania olejem PAO8 – uzyskano dwukrotne zwiększenie obciążenia zacierającego dla węzła tarcia z kulką z powłoką a-C:H:W w porównaniu do węzła tarcia z kulką ze

stali 100Cr6, uzyskując tym samym przebieg podobny do handlowego oleju GL5 na bazie syntetycznej (rys. 2.24) [49, 50].

Trwałość smarowanych węzłów ciernych z powłokami a-C:H:W zależy nie tylko od zastosowanego środka smarowego, ale także od kompozycji materiałowej węzła tarcia. W publikacjach [41, 63] podczas testów w skojarzeniu badawczym aparatu T-02 (cztery kule) w warunkach smarowania olejem bazowym PAO8 najwyższą odporność na zacieranie wykazywało skojarzenie, w którym powłokę a-C:H:W ukształtowano na ruchomej kulce skojarzenia badawczego (rys. 2.25). Większa powierzchnia tarcia umożliwiła pracę powłoki w korzystniejszych warunkach tarcia. W porównaniu do tej konfiguracji, skojarzenie powłoka - powłoka osiągnęło o 30% niższą wartość obciążenia zacierającego  $P_t$ , a skojarzenie badawcze w którym powłokę naniesiono na kulki nieruchome (mniejsza powierzchnia tarcia) o 76% niższą. Skojarzenie z kulkami nieruchomymi z powłoką DLC osiąga nadal wartość obciążenia  $P_t$  o kilkanaście procent wyższą od referencyjnego skojarzenia stal - stal z elementami bez powłoki.



Rysunek 2.25. Moment tarcia w skojarzeniach materiałowych w styku czterokulowym stal 100Cr6/powłoka a-C:H:W; temperatura początkowa 20°C [63]

Przeprowadzone próby wykazały, że powłokę a-C:H:W korzystniej jest kształtować na elementach o większej powierzchni tarcia. Zapewnia to mniejsze naciski jednostkowe na powłokę i tym samym polepsza warunki tarcia, zwiększając tym samym jej trwałość [41, 63]. Podobnie jak w przypadku pozycji [61] powłoka a-C:H:W przejęła rolę dodatków smarowych do oleju bazowego, zwiększając odporność elementów węzła na zacieranie. Przyczyną zwiększenia trwałości węzła tarcia było również wyeliminowanie powinowactwa materiałowego pomiędzy powłoką, a materiałem rodzimym kulek [41, 63].

Na odporność na zużycie powłok wpływ ma także materiał międzywarstwy powłoki [53, 64]. Według badań przedstawionych w publikacji [65] w porównaniu do prób przeprowadzonych na skojarzeniu ciernym bez powłoki (kulka ze stali 100Cr6

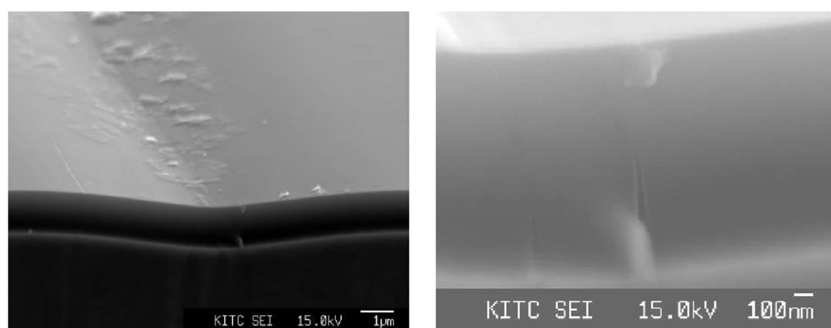
oraz kulka ceramiczna  $Zr_2O_3 \times Y_2O_3$  – tarcza ze stali HS6-5-2) skojarzenia z powłokami a-C:H:W, CrN/a-C:H:W oraz TiN/a-C:H:W wykazywały niższy współczynnik tarcia podczas prób. W badaniach w nanoskali powłoka a-C:H:W posiada najlepsze właściwości tribologiczne. W badaniach mikro i makroskali najlepsze właściwości prezentowała powłoka a-C:H:W z międzywarstwą CrN.

Jednym z problemów występujących podczas eksploatacji powłok DLC jest skłonność do pęknięcia powłoki. Materiały o wysokiej twardości charakteryzują się zazwyczaj niższą odpornością na pęknięcie, co z kolei prowadzi do powstawania mikropęknięć w warstwie wierzchniej. W przypadku kształtowania na tych materiałach powłok DLC może wystąpić przyspieszone zużycie związane z pękaniem powłoki na całej jej grubości, znacznie zwiększając stopień zużycia w porównaniu do zużycia ściernego. Zjawisko to może być intensyfikowane w podwyższonych temperaturach pracy skojarzenia ściernego [55, 66].

Testy powłok DLC przeprowadzone w warunkach tarcia suchego oraz w warunkach smarowania roztworem Ringera w styku kulka - tarcza (Tribotester T-01M) wykazały niższą intensywność zużycia oraz niższy współczynnik tarcia w skojarzeniach ciernych stopów CoCrMo z powłoką a-C:H w styku z kulką  $\alpha-Al_2O_3$  w porównaniu do par ciernych z próbkami CoCrMo bez powłoki [3]. Również w trakcie testów przeprowadzonych na tribotesterze T-17 (trzcina UHMWPE – płytka CoCrMo) w warunkach smarowania roztworem Ringera skojarzenia ciernie z próbkami z powłokami a-C:H i a-C:H:W wykazują mniejszą intensywność zużywania i niższe wartości współczynnika tarcia w porównaniu do par ciernych, w których zastosowano próbki z materiału podkładowego. Autorzy publikacji zwrócili także uwagę na zjawisko skokowych wzrostów emisji akustycznej pojawiających się w trakcie testów przyczepności do powierzchni metodą zarysowania (*scratch-test*). Zjawisko to dotyczyło zarówno powłok a-C:H jak i a-C:H:W ukształtowanych na stopie CoCrMo. Jako przyczynę takiego stanu rzeczy autorzy podają proces pęknięcia powłoki w trakcie próby w warunkach pracy węzła tarcia pod obciążeniem. Podobne wnioski przedstawili autorzy publikacji [67], gdzie dla badanych powłok DLC rejestrowano wzrost sygnału emisji akustycznej w momencie zniszczenia powłoki i odkrycia materiału podłoża oraz autorzy badań [68], w których sygnał emisji akustycznej występował w testach zarysowania powłoki a-C:H:W w momencie zwiększania obciążenia.

Pęknięcie powłoki a-C:H zauważono także podczas badań opisanych w opracowaniu [69]. W trakcie testów w styku kulka (aluminium) - tarcza w warunkach

tarcia suchego i obciążeniach siłą  $P=2, 5, 10, 15, 20$  N zadawanych skokowo co 200 m drogi tarcia, zaobserwowano zjawisko pęknięcia powłoki a-C:H. Pęknięcia wystąpiły na powłoce o grubości 1  $\mu\text{m}$ . Nie zaobserwowano obecności pęknięć na powierzchni powłok o grubości 0,3 i 0,6  $\mu\text{m}$  (rys. 2.26). Badania wykazały również wyższą odporność na rozwarstwienie powłoki a-C:H w porównaniu do powłoki ta-C o tej samej grubości 0,3  $\mu\text{m}$  [69].



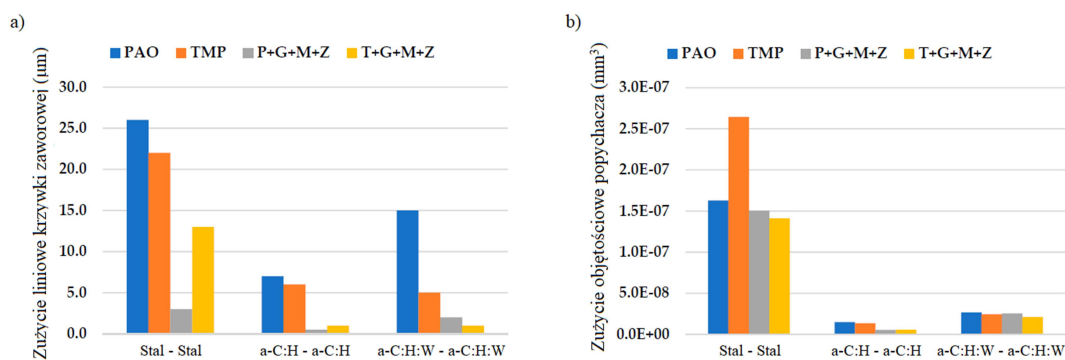
Rysunek 2.26. Powierzchnia powłoki a-C:H po testach w styku kulka - tarcza z widocznym pęknięciem [69]

Właściwości powłok węglowych w podwyższonych temperaturach nie są identyczne w porównaniu do właściwości uzyskiwanych w temperaturze pokojowej. Jest to nie bez znaczenia w przypadku zastosowania powłok na warstwę powierzchniową elementów par ciernych silników spalinowych pracujących w szerokim zakresie temperatur. W artykule [70] badacze Kot, Zimowski i in. przedstawili wyniki badań tribologicznych powłok a-C, a-C:N i a-C:H, porównując ich właściwości w temperaturach 20 i 300°C. Próby wykazały niekorzystny wpływ wzrostu temperatury na wielkość zużycia elementów pary cierniej pracującej w styku kulka - tarcza z użyciem kulki  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i płytek ze stali X5CrNi18-10 z ukształtowanymi powłokami. Z badań wynika, że najmniejszą wrażliwość na podwyższoną temperaturę, biorąc pod uwagę kryterium wskaźnika zużycia posiada powłoka uwodorniona a-C:H (wzrost o 46,6% względem prób w temperaturze 20°C). Dla powłok typu a-C wskaźnik zużycia wzrósł 450-krotnie, a dla a-C:N wskaźnik zużycia jest 16-krotnie wyższy w temperaturze 300°C niż w temperaturze 20°C.

Autorzy opracowania [71] przedstawili wyniki badań powłok DLC typu a-C:H:W teksturowanych laserowo. Na powłoce węglowej ukształtowanej na pierścieniach ze stali 4H13 wykonano laserowo mikrookręgi o średnicy 100  $\mu\text{m}$  i głębokości 1,5  $\mu\text{m}$ . Badania tribologiczne z użyciem tribotestera T-01M w styku skoncentrowanym kulka - tarcza (stal 100Cr6 - stal 4H13 + powłoka a-C:H:W) w warunkach ciągłego smarowania

olejem parafinowym wykazały spadek wartości współczynnika tarcia próbek teksturowanych do wartości  $\mu=0,031$  pod koniec biegu badawczego ( $t=1000$  s,  $P=9,8$  N,  $v=0,8$  m/s). W identycznych warunkach badania wartość współczynnika tarcia próbki z powłoką nieteksturowaną wyniosła  $\mu=0,085$ . Zjawisko spadku współczynnika tarcia tłumaczone jest poprawą warunków smarowania w parze ciernej, ponieważ wgłębienia w kształcie mikrookręgów pełnią rolę zasobników środka smarowego.

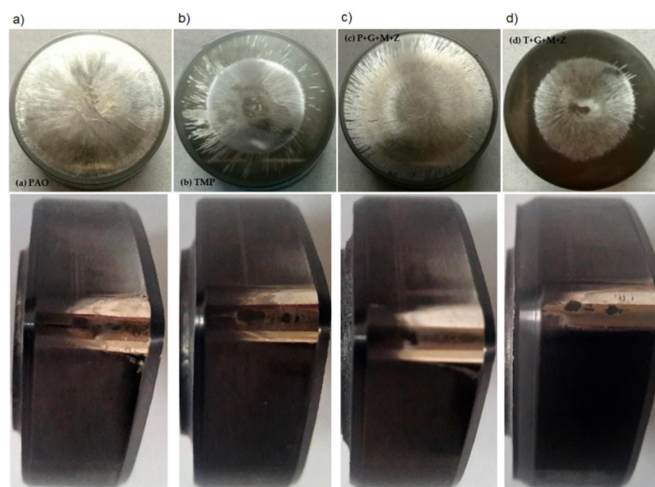
Zahid, Bhutta i in. w pracy [72] opisują badania tribologiczne przeprowadzone w skojarzeniu ciernym wałek rozrządu - popychacze zaworowe głowicy silnika spalinowego OM646LA. W badaniach elementy skojarzenia ciernego pokryto powłoką a-C:H oraz a-C:H:W, punktem odniesienia były elementy fabryczne, bez ukształtowanych powłok węglowych. Testy przeprowadzono w obecności syntetycznego oleju bazowego PAO, modyfikowanego chemicznie oleju palmowego TMP oraz kompozycji olejowych tych olejów z dodatkami GMO, MoDTC oraz ZDDP (ZnDTP) w proporcji wagowej 97/1/1/1%. Względem fabrycznych elementów wężła ciernego zmierzone ubytki objętościowe popychaczy zaworowych wykazały znaczny spadek wartości w przypadku zastosowania elementów z ukształtowanymi powłokami węglowymi, najmniejsze w przypadku powłok a-C:H, nieco wyższe dla powłok a-C:H:W. Również zużycie liniowe krzywek zaworowych z ukształtowanymi powłokami a-C:H i a-C:H:W zostało zredukowane względem elementów bez powłok węglowych w warunkach smarowania badanymi olejami (rys. 2.27).



Rysunek 2.27. Zużycie liniowe krzywek (a) oraz zużycie objętościowe popychaczy zaworowych (b) [72]

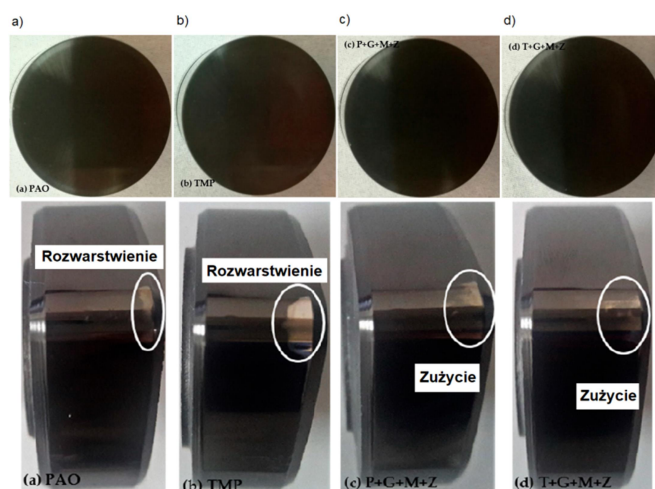
Zużycie powierzchni krzywek i popychaczy było bardziej widoczne w przypadku elementów z powłokami a-C:H:W, w których nastąpiło rozwarstwienie powłoki na wierzchołku krzywki oraz jej wytarcie na powierzchni roboczej popychaczy, szczególnie widoczne w parach pracujących z olejami PAO i TMP bez dodatków

przeciwzużyciowych. Proces zużywania powłok został do pewnego stopnia ograniczony w przypadku kompozycji z dodatkami GMO, MoDTC i ZDDP (ZnDTP) (rys. 2.28).



Rysunek 2.28. Powierzchnia popychaczy zaworowych oraz krzywek z powłoką a-C:H:W po próbach stanowiskowych w obecności olejów: a) PAO, b) TMP, c) PAO z dodatkami GMO, MoDTC i ZnDTP, d) TMP z dodatkami GMO, MoDTC i ZnDTP [72]

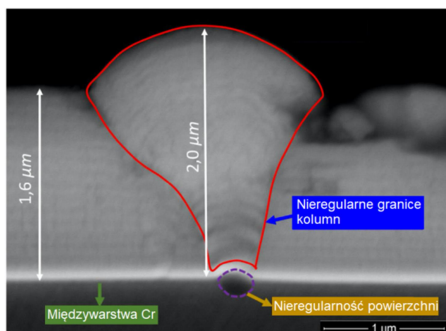
Powierzchnie popychaczy pokryte powłoką a-C:H nie nosiły śladów intensywnego zużycia, zaś powłoki naniesione na krzywki uległy rozwarstwieniu na wierzchołkach tylko w przypadku smarowania olejami PAO i TMP bez dodatków przeciwzużyciowych (rys. 2.29) [72].



Rysunek 2.29. Powierzchnia popychaczy zaworowych oraz krzywek z powłoką a-C:H po próbach stanowiskowych w obecności olejów: a) PAO, b) TMP, c) PAO z dodatkami GMO, MoDTC i ZnDTP, d) TMP z dodatkami GMO, MoDTC i ZnDTP [72]

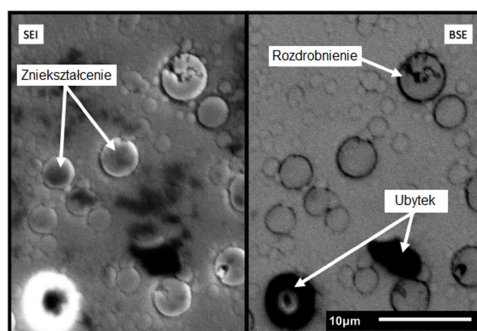
W przypadku nieregularnego kształtu powlekanego elementu, obecności wad powierzchni, pojawienia się zakłóceń w procesie PVD lub połączenia tych czynników w materiale powłoki mogą pojawić się nieciągłości w postaci pustych przestrzeni i makrocząstek (rys. 2.30) [68]. Defekty te powodują lokalne obniżenie właściwości

mechanicznych i odporności na zużycie. Badania przeprowadzone przez autorów publikacji [68] przedstawiają wpływ defektów struktury na procesy tribologiczne powłok a-C:H:W w warunkach tarcia ślizgowego.



Rysunek 2.30. Przekrój poprzeczny powłoki a-C:H:W z obszarem z nieregularnymi granicami kolumn [68]

Powłoka została osadzona na płytce ze stali narzędziowej AISI H13, kulki wykonano ze stali łożyskowej AISI 52100. Para cierna pracowała w skojarzeniu o ruchu posuwisto-zwrotnym w obecności mieszaniny olejów PAO4 i PAO6 w stosunku 1:1. Obciążenie zwiększano od 0 do 150 N co 5 N w odstępach 20 sekundowych, skok kulki wynosił 5 mm, osiągając maksymalną prędkość ślizgania  $v=0,16$  m/s. Obecność nieregularnych granic kolumn w strukturze powłoki powoduje wzrost liczby defektów i tym samym występowanie takich zjawisk jak ich odrywanie i kruszenie fragmentów powłoki w trakcie testów tribologicznych, pogarszając tym samym odporność powłoki na zużycie (rys. 2.31) [68].



Rysunek 2.31. Uszkodzenia powłoki a-C:H:W po testach w styku kulka-tarcza [68]

Badania zamieszczone w publikacji [17] skupiają się na wytypowaniu bazy olejowej zapewniającej wysoką odporność na zacieranie. Spośród baz olejowych, m.in. SAE 30/95, oleju mineralnego białego, bazy poliestrowej i bazy poliglikolowej wytypowano bazę polialfaolefinową PAO jako najbardziej kompatybilną z powłoką typu a-C:H:W. W pracy zwrócono uwagę na zjawisko całkowitego unieruchomienia skojarzenia czterokulowego w trakcie prób z rosnącym obciążeniem węzła tarcia. Jako

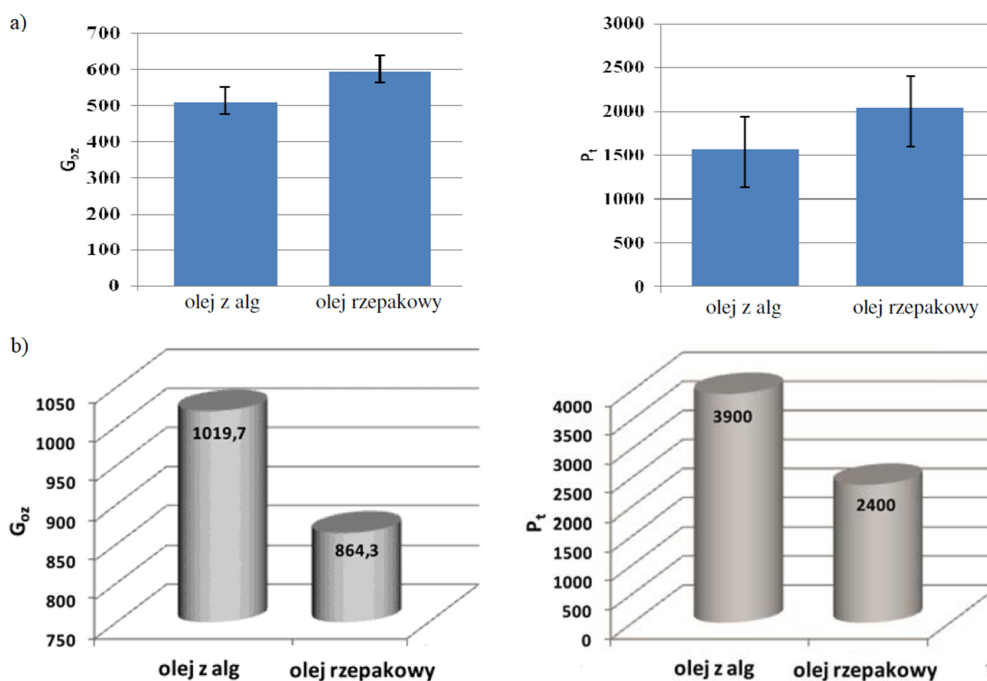
przyczynę wskazano brak dodatków typu EP (*extreme pressure*) w oleju bazowym. Najlepszy efekt otrzymano stosując dodatek EP na bazie organicznych pochodnych siarki i fosforu dodanych w ilości 0,4% do oleju PAO. Zastosowanie w oleju sulfidów, siarkowanych estrów syntetycznych lub siarkowanych estrów naturalnych kwasów tłuszczowych nie niwelowało zjawiska całkowitego zacierania skojarzenia ciernego lub miało agresywne działanie korozyjne na elementy węzła tarcia [17].

Grądkowski i in. w opracowaniu [73] będącym rozwinięciem ich wcześniejszej publikacji [17] zwracają uwagę na potencjał kompozycji olejów bazowych PAO8 z zestawem dodatków uszlachetniających (w tym ekologicznych dodatków pochodzenia roślinnego) jako kompozycji smarowej do węzłów tarcia narażonych na zużywanie i zacieranie. Najlepsze wśród badanych kompozycji olejowych właściwości podczas badań na aparacie czterokulowym T02 wykazała baza olejowa PAO8 z dodatkiem 20% wagowo pakietu dodatków uszlachetniających, uzyskując najwyższe wartości parametrów  $G_{oz}$ ,  $L_{10}$ , i  $P_t$  [73].

W literaturze wśród dodatków do środków smarowych polepszających ich właściwości użytkowe (głównie przeciwzużyciowe i przeciwwzatarciowe) wymieniany jest dwusiarczek molibdenu  $MoS_2$  [74, 75, 76, 77]. Dwusiarczek molibdenu jest substancją o budowie warstwowej, odporną na wysokie temperatury (początek utleniania przy temperaturze 300-420°C), charakteryzującą się dobrą przyczepnością do podłoża. W publikacji [76] dodatek 5% komercyjnego preparatu eksploatacyjnego na bazie  $MoS_2$  do mineralnego oleju silnikowego API CE/SF SAE 15W40 podczas badań skojarzenia czterokulowego wg procedury PN-76/C-04147 spowodował wzrost obciążenia zespawania  $P_z$  o 57,8%, obciążenia zacierającego  $P_t$  o 12% oraz wskaźnika zużycia pod obciążeniem  $I_h$  o 8,3% przy braku zmian obciążenia niezacierającego  $P_n$  względem wartości zmierzonych podczas badań oleju bez dodatku. Ta sama ilość dodatku  $MoS_2$  wprowadzona do oleju syntetycznego API SM/CF SAE 5W40 wpłynęła na zwiększenie parametru  $P_z$  o 27%,  $P_t$  o 6,2%,  $P_n$  o 26% oraz  $I_h$  o 22,1% [76]. Natomiast badania w styku kulka 100Cr6 - tarcza AlSi6Cu4 w warunkach obciążenia siłą  $P=10$  N z prędkością liniową  $v=0,05$  m/s na drodze tarcia  $s=500$  m w obecności oleju SAE 15W40 modyfikowanego dodatkiem na bazie  $MoS_2$  wykazały spadek współczynnika tarcia rejestrowanego w trakcie prób o 9,6% w porównaniu do oleju niemodyfikowanego oraz zmniejszenie intensywności zużycia stopu AlSi6Cu4, poprzez ograniczenie zużycia ściernego tarczy [74].



Wyniki przedstawione w publikacjach [78, 79] wykazały korzystny wpływ zastosowania powłoki a-C:H:W na właściwości przeciwzużyciowe i przeciwzatarciowe skojarzenia badawczego aparatu czterokulowego T-02 pracującego w obecności oleju algowego i rzepakowego. W badaniach tribologicznych w warunkach tarcia mieszanego (stałe obciążenie węzła tarcia  $P=392$  N, czas trwania próby  $t=3600$  s, prędkość obrotowa  $n=500$  obr/min) w skojarzeniu stal 100Cr6 - stal 100Cr6 graniczne obciążenie zużycia  $G_{oz}$  kształtowało się na poziomie  $\sim 500$  N/mm<sup>2</sup> i dla oleju z alg i  $\sim 600$  N/mm<sup>2</sup> dla oleju rzepakowego (rys. 2.32a). Zmiana skojarzenia trącego na kulki pokryte powłoką a-C:H:W spowodowała wzrost wartości  $G_{oz}$  do 1019,7 N/mm<sup>2</sup> i 864,3 N/mm<sup>2</sup> odpowiednio dla oleju algowego i rzepakowego (rys. 2.32b).



Rysunek 2.32. Graniczne obciążenie zużycia  $G_{oz}$  i obciążenie zacierające  $P_t$  w skojarzeniach ciernych: a) stal - stal, b) powłoka - powłoka [78, 79]

Obciążenie zacierające  $P_t$  w skojarzeniu smarowanym olejem z alg w próbach właściwości przeciwzatarciowych w warunkach ciągłego wzrostu obciążenia wzrosło 2,5-krotnie względem skojarzenia stal - stal. W przypadku skojarzenia ciernego smarowanego olejem rzepakowym wzrost ten wyniósł ok. 17% w porównaniu do stalowego węzła badawczego. Autorzy publikacji zwracają uwagę na obiecujące właściwości fizykochemiczne oleju z alg, zbliżone do właściwości handlowego oleju rzepakowego oraz korzystne właściwości przeciwzużyciowe i przeciwzatarciowe, szczególnie w skojarzeniu z elementami z powłokami a-C:H:W [78,79].

## 2.8. Podsumowanie przeglądu literatury

Zapobieganie negatywnym skutkom tarcia w węzłach ciernych jest istotnym i aktualnym kierunkiem współczesnych badań, a realizowane prace związane są głównie z doborem lub opracowywaniem nowych materiałów odpornych na zużycie. Aktualnie wiele realizowanych prac badawczych zajmuje się zagadnieniami związanymi z doborem powłok przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych, które zapewniłyby w warunkach zużycia tribologicznego wymagane cechy użytkowe [10, 48, 55, 72, 80]. Powłoki odporne na zużycie umożliwiają zwiększenie trwałości i niezawodności maszyn oraz urządzeń, przy zachowaniu istniejącego gabarytu węzłów ciernych i istotnym wzroście ich obciążenia lub obniżeniem masy i kosztów wytwarzania. Poprawa właściwości tribologicznych w węzłach tarcia z elementami z ukształtowanymi powłokami przeciwzużyciowymi i przeciwzatarciowymi pozwala również na zmniejszenie strat energii wywołanych oporami tarcia i zmniejszenie intensywności zużycia części maszyn [38, 46, 48, 60, 72].

Obecne zainteresowanie powłokami DLC, w tym powłoką typu a-C:H:W wynika z ich zalet przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych. Powłoki węglowe można stosować w węzłach ciernych, których elementy są wykonane z materiałów o obniżonych właściwościach użytkowych (niejednokrotnie tańszych) uzyskując warstwy powierzchniowe o wymaganych właściwościach eksploatacyjnych. Można jednak wskazać wady powłok węglowych, takie jak możliwość pęknięcia w trakcie eksploatacji [3, 67, 68, 69], obniżone właściwości mechaniczne w przypadku wystąpienia nieprawidłowości w procesie kształtowania powłok [68] lub obniżenie właściwości w podwyższonych temperaturach pracy [55, 66, 68, 70]. Większość badań tribologicznych obejmuje wąski zakres pracy powłok DLC przy ściśle określonym skojarzeniu materiałowym oraz geometrii styku wynikającej z zastosowanego stanowiska badawczego. W publikacjach również najczęściej prezentowane są wyniki współpracy kompozycji materiałowej stal - powłoka, pracującej w ustalonych warunkach obciążenia styku wynikającym z konstrukcji węzła tarcia [51, 55, 57, 59]. Natomiast incydentalnie prezentowane są wyniki badań procesów tarcia zachodzących w układach tribologicznych, w których występuje węzeł cierny z materiałami konstrukcyjnymi stosowanymi w rzeczywistych węzłach tarcia.

Istotnym zagadnieniem w eksploatacji węzłów ciernych z powłokami węglowymi jest dobór środków smarowych. Dostępne obecnie na rynku środki smarowe dedykowane są do konstrukcji, w których powszechnie stosowane są elementy stalowe

w połączeniu z materiałami łożyskowymi [3, 55, 100]. Ważnym zagadnieniem jest brak potwierdzenia kompatybilności obecnie stosowanych środków smarowych i twardych powłok niskotarciowych w warunkach wspólnego ich zastosowania w węzłach ciernych [10,73, 50]. Dodatkowo w pracach badawczych procesy tribologiczne analizowane są głównie w warunkach tarcia technicznie suchego [52, 59, 69] lub przy smarowaniu obszaru tarcia olejami bazowymi [49, 50, 51, 52, 55] i w kompozycji materiałowej charakterystycznej dla danego stanowiska badawczego. Część prac jest realizowana w warunkach smarowania obszaru tarcia olejami bazowymi z dodatkami modyfikującymi, istniejącymi komercyjnymi środkami smarowymi, czy nowymi kompozycjami olejowymi [17, 57, 79]. Dodatki uszlachetniające stosowane w olejach komercyjnych, przewidziane pierwotnie do współpracy z węzłami stalowymi, w węzłach tarcia z powłoką a-C:H:W mogą działać w ograniczonym stopniu lub nawet zwiększać opory tarcia i stopień zużycia współpracujących elementów [56]. Natomiast dobranie odpowiedniego dodatku lub kompozycji dodatków może zapewnić parze ciernej z powłoką a-C:H:W niskie wartości współczynnika tarcia i wysoką odporność na zużycie [57, 58]. W prowadzonych badaniach tarcia i zużycia do smarowania badanych węzłów tarcia z powłoką stosuje się przede wszystkim oleje nowe, nieeksploatowane. Istotnym problemem dotyczącym stosowania eksploatowanego środka smarowego do smarowania węzłów ciernych jest destrukcja jego początkowych właściwości i wpływ rzeczywistych właściwości użytkowych na procesy tarcia i zużycia. W obecnych tendencjach dotyczących stosowania środków smarowych coraz większą uwagę przywiązuje się także do ich biodegradowalności, przy czym w publikacjach przedstawiane są wyniki badań z zastosowaniem olejów biodegradowalnych, takich jak olej rzepakowy, palmowy czy kokosowy, lecz brak jest publikacji z badaniami powłok a-C:H:W z handlowymi olejami o oznaczonym stopniu biodegradowalności [45].

Prezentowane w publikacjach wyniki badań, ze względu na przyjęte warunki tarcia wynikające z konstrukcji węzła tarcia, obciążenia węzła tarcia, warunków smarowania i kompozycji materiałowej badanego skojarzenia nie pozwalają na kompleksowe ujęcie procesów tribologicznych występujących w węzłach ciernych z elementami z powłoką a-C:H:W. Z tego powodu w pracy podjęto badania, które obejmują analizę warunków tarcia w skojarzeniach ciernych zbudowanych z materiałów występujących w rzeczywistych węzłach tarcia (w węzłach tarcia w silnikach spalinowych) z uwzględnieniem styku liniowego i rozłożonego. W styku liniowym

badano powszechnie stosowaną kompozycję materiałową stal - stal oraz modyfikację z powłoką a-C:H:W - stal, zaś w styku rozłożonym rzeczywistą kompozycję stop łożyskowy - stal oraz modyfikację stop łożyskowy - powłoka a-C:H:W. W badaniach uwzględniono zmienne obciążenia działające na elementy skojarzenia ciernego i etapy pracy pary cierniej, takie jak rozruch pary, praca w warunkach ustalonego obciążenia i ograniczonego smarowania. W programie badań uwzględniono zastosowanie do smarowania węzłów ciernych zarówno handlowego oleju silnikowego nieużywanego, jak i po eksploatacji w rzeczywistym silniku spalinowym, handlowego oleju o określonym stopniu biodegradowalności i niekomercyjnej kompozycji syntetycznego oleju bazowego PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu MoS<sub>2</sub>. Istotą pracy jest także analiza wpływu zużycia olejów w badaniach stanowiskowych na ich właściwości przeciwwzatarciowe, ponieważ intensywne zjawiska na powierzchni tarcia wywołują istotne zmiany w zastosowanym środku smarowym, jak również prowadzą do tworzenia nowych związków chemicznych.

Analiza wyników badań stanowiskowych umożliwi dokonanie kompleksowej oceny możliwości zastosowania komercyjnej powłoki węglowej typu a-C:H:W i wybranych środków smarowych (przede wszystkim olejów silnikowych) do zastosowania w węzłach ciernych pracujących w warunkach ograniczonego smarowania. Dane te mogą posłużyć do konstruowania i opracowywania węzłów tarcia z powłoką a-C:H:W pracujących w warunkach smarowania olejami silnikowymi przy zmiennych obciążeniach. Istotne jest również, że zastosowanie powłoki a-C:H:W może pozwolić przejąć niektóre funkcje oleju w warunkach przeciążeń węzła ciernego i wyeliminować stosowane w środkach smarowych dodatki uszlachetniające mające niekorzystny wpływ na środowisko naturalne.

### **3. CEL, HIPOTEZA NAUKOWA I ZAKRES PRACY**

#### **Cel naukowy**

Wyznaczenie wpływu technologicznej powłoki na bazie amorficznego węgla (a-C:H:W) wytworzonej metodą PVD na elemencie pary ciernej i rodzaju oleju smarującego na procesy tarcia i zużycia zachodzące w warunkach ograniczonego smarowania.

#### **Cel praktyczny**

Zwiększenie trwałości węzłów ciernych, a docelowo poprawienie funkcjonalności układu mechanicznego, zmniejszenie zapotrzebowania na energię i zwiększenie parametrów eksploatacyjnych przy zachowaniu obecnego gabarytu węzła ciernego.

#### **Hipoteza badawcza**

Zastosowanie powłok na bazie amorficznego węgla a-C:H:W w węzłach ciernych w styku rozłożonym i liniowym z udziałem materiałów konstrukcyjnych stosowanych w węzłach silników spalinowych, pracujących w warunkach ograniczonego smarowania syntetycznymi olejami silnikowymi może wpłynąć na poprawę właściwości tribologicznych w dynamicznie obciążonych parach ciernych przy zachowaniu istniejącej konstrukcji i warunków obciążenia.

#### **Zakres pracy**

Osiągnięcie celu naukowego i weryfikacja prawdziwości hipotezy badawczej wymagała przeprowadzenia analizy literaturowej stanu zagadnienia, a także przeprowadzenia porównawczych badań własnych. Zakres pracy obejmuje:

- przegląd literatury krajowej i zagranicznej dotyczącej węzłów ciernych, środków smarowych oraz powłok DLC, w tym powłok typu a-C:H:W,
- opracowanie metodyki badań skojarzeń tribologicznych w warunkach ograniczonego smarowania,
- przeprowadzenie porównawczych badań tribologicznych par ciernych pracujących w styku rozłożonym i liniowym,
- badania właściwości przeciwzatarciowych zastosowanych środków smarowych przed i po badaniach w niekonforemnym węźle tarcia,
- analizę uzyskanych wyników:
  - określenie ilościowego i jakościowego wpływu ukształtowanej warstwy powierzchniowej elementu węzła ciernego (powłoki na bazie amorficznego węgla a-C:H:W) wytworzonej metodą PVD na elemencie pary ciernej i rodzaju środka

- smarowego (syntetyczne oleje silnikowe) na parametry współpracy pary ciernej (współczynnik tarcia, moment rozruchowy, siła tarcia i temperatura w obszarze tarcia) w styku konforemnym i niekonforemnym,
- wyznaczenie zużycia elementów węzłów ciernych i określenie zmian w strukturze warstwy powierzchniowej ukształtowanej w procesie tarcia,
  - podsumowanie przeprowadzonych badań i przedstawienie wniosków.

## 4. BADANIA WŁASNE

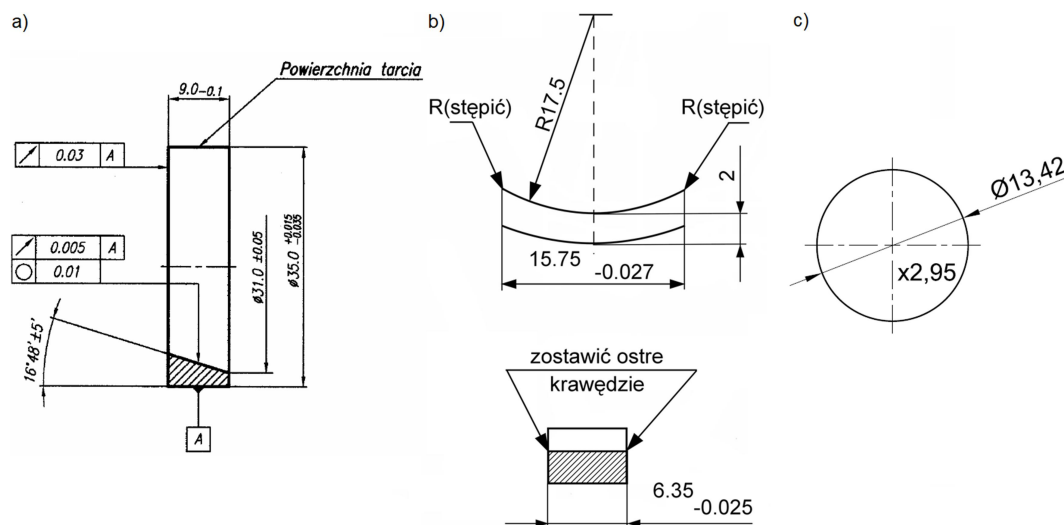
### 4.1. Obiekt badań

Obiektem badań są pary cierne składające się z elementów rolka-klocki skojarzonych w styku rozłożonym i liniowym. W styku rozłożonym zastosowano w parach stalowe próbki pierścieniowe, które współpracowały z wycinkiem półpanewki łożyskowej wykonanej ze stopu łożyskowego. W styku liniowym parę cierną stanowiły próbki pierścieniowe i komercyjne stalowe płytki zaworowe. Pary cierne pracowały w warunkach ograniczonego smarowania, w których środkiem smarowym były wybrane oleje silnikowe: nowy 5W40, zużyty 5W40, biodegradowalny 10W40 oraz kompozycja smarowa olej PAO8 + 2% MoS<sub>2</sub>.

W badaniach stanowiskowych w styku rozłożonym zastosowano próbki pierścieniowe wykonane ze stali 34CrNiMo6 (tabela 4.1) o wymiarach  $\phi 35 \times 9$  mm (rys. 4.1).

Tabela 4.1. Skład chemiczny stali 34CrNiMo6 [81]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
0,32-0,40%	0,5-0,7%	0,17-0,37%	max 0,035%	max 0,035%	1,3-1,7%	1,3-1,7%	0,15-0,25%	max 0,3%	reszta



Rysunek 4.1. Kształt i wymiary elementów pary ciernej: a) próbka pierścieniowa, b) przeciwpróbka ze stopu łożyskowego CuPb30, c) przeciwpróbka do badań w styku liniowym (płytki zaworowe) (opracowanie własne)

Na tych próbkach ukształtowano warstwy powierzchniowe w procesach obróbki powierzchniowej ulepszenie cieplne (twardość  $40 \pm 2$  HRC) i fizycznego procesu nanoszenia powłoki węglowej a-C:H:W (tabela 4.2). Grubość powłoki ukształtowanej w procesie technologicznym to  $\sim 2$   $\mu\text{m}$ .

Tabela 4.2. Właściwości handlowej powłoki węglowej typu a-C:H:W [7]

Cecha	Wartość/typ
Proces technologiczny	Natrysk
Typowa grubość powłoki [ $\mu\text{m}$ ]	1 - 4
Współczynnik tarcia	0,1 - 0,2
Kolor	Antracytowy
Mikrotwardość $HV_{0,05}$	1000
Twardość powłoki $H_{IT}$ [GPa]	8-12 / 12-15
Maksymalna temperatura pracy [ $^{\circ}\text{C}$ ]	300
Temperatura powlekania [ $^{\circ}\text{C}$ ]	< 250

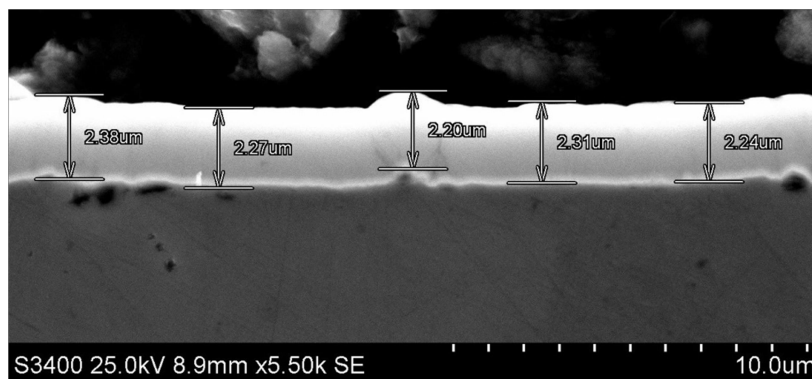
Przeciwpróbki użyte do badań w styku rozłożonym zostały wykonane z panewek łożyskowych z warstwą ślizgową ze stopu łożyskowego CuPb30 (tabela 4.3), stosowanego w układzie łożyskowania wału korbowego silników spalinowych. Przeciwpróbki stanowią wycinek handlowej półpanewki wału korbowego o promieniu 17,5 mm i wymiarach 15,75 x 6,35 x 2 mm (rys. 4.1).

Tabela 4.3. Skład chemiczny i właściwości mechaniczne stopu łożyskowego CuPb30 [82]

Parametr	Wartość
Zawartość ołowiu (% wagowo)	26-33
Zawartość miedzi	reszta
Temperatura maksymalna $T_{\text{max}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	150-280
Obciążenie maksymalne $P_{\text{max}}$ [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]	140-250
Naciski jednostkowe [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]	100-200
Twardość w skali HB	30-45

W badaniach w styku liniowym próbki pierścieniowe ulepszone cieplnie skojarzono z przeciwpróbkami, którymi były regulatory luzu zaworowego o kształcie walcowych płytek o wymiarach  $\phi 13,42 \times 2,95$  mm (skład chemiczny: C=1,005%, Si=0,2%, Al=0,02%, Mo=0,003% Mn=0,54%, Cr=0,21%, Cu=0,034%, Co=0,04%, Fe=reszta) (rys. 4.1). Twardość płytek zaworowych zawiera się w zakresie 61÷63 HRC. W badaniach zastosowano regulatory z warstwą wierzchnią utwardzaną powierzchniowo (wersja handlowa) i z naniesioną powłoką a-C:H:W o grubości  $\sim 2 \mu\text{m}$  (rys. 4.2).





Rysunek 4.2. Grubość powłoki a-C:H:W ukształtowanej na powierzchni płytek zaworowych (fot. własna)

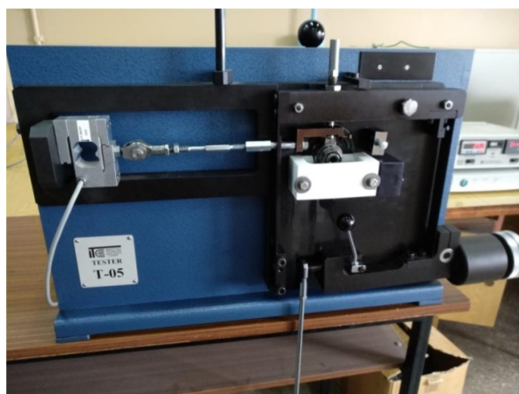
Do smarowania badanych węzłów ciernych zastosowano cztery rodzaje olejów:

1. Syntetyczny olej silnikowy SAE 5W40 (VW 502 00/505 01) – określany w dalszej części pracy jako „olej nowy 5W40”. Producent określa go jako lekkobieżny olej przeznaczony do silników benzynowych bez filtra cząstek stałych [83].
2. Syntetyczny olej silnikowy SAE 5W40 (jak wyżej) po eksploatacji w silniku benzynowym o zapłonie iskrowym, turbodoładowanym, z wtryskiem bezpośrednim do komory spalania (po przebiegu 5000 km - głównie w cyklu miejskim) – określany w dalszej części pracy jako „olej zużyty 5W40”.
3. Olej syntetyczny SAE 10W40 (ACEA E6/E7/E9, API CJ-4/SN) low-SAPS. Producent określa ten olej jako biodegradowalny (poziom biodegradowalności według normy OECD 301 B wynosi powyżej 60%). W dalszej części pracy ten olej określany jest jako „olej biodegradowalny 10W40” [84].
4. Olej stanowiący kompozycję syntetycznego oleju bazowego PAO8 bez dodatków smarowościowych z dodatkiem 2% wagowo nanocząstek dwusiarczku molibdenu  $\text{MoS}_2$  oraz dodatkami zapobiegającymi rozwarstwianiu się oleju. Średnica nanocząstek zawiera się w zakresie 100-150 nm. W dalszej części pracy ten olej określany jest jako „PAO8 +  $\text{MoS}_2$ ” lub „olej bazowy z dodatkiem dwusiarczku molibdenu” [85].

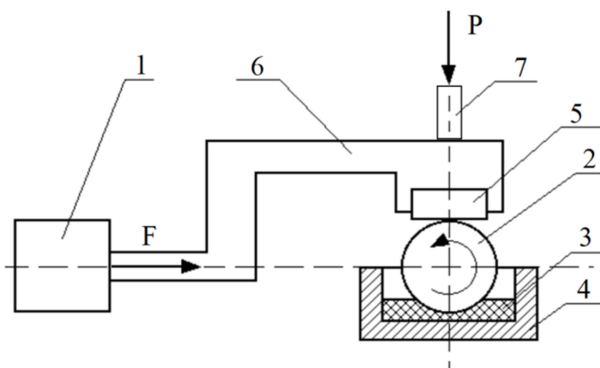
Właściwości eksploatacyjne nowego oleju 5W40 oraz oleju biodegradowalnego 10W40 odczytano z kart katalogowych producentów olejów. Lepkość kinematyczną zużytego oleju 5W40 oraz oleju PAO8 +  $\text{MoS}_2$  zmierzono lepkościomierzem Herzog HVU 482, a wskaźnik lepkości wyliczono wg wskazań producenta stanowiska. Pomiar gęstości oleju zużytego 5W40 oraz oleju PAO8 +  $\text{MoS}_2$  wykonano gęstościomierzem Anton Paar DMA 5600M (tabela 4.4).

Tabela 4.4. Właściwości badanych olejów silnikowych [83, 84, 85]

Parametr	5W40 nowy	5W40 zużyty	10W40 biodegradowalny	PAO8 + MoS <sub>2</sub>
Lepkość kinematyczna w temp. 40°C [mm <sup>2</sup> /s]	85,3	63,1	91,1	51,99
Lepkość kinematyczna w temp. 100°C [mm <sup>2</sup> /s]	14,2	11,4	14,3	8,16
Wskaźnik lepkości	173	177	163	128
Gęstość względna w temp. 15°C [g/cm <sup>3</sup> ]	0,854	0,860	0,920	0,834
Poziom biodegradowalności wg normy OECD 301 B	–	–	> 60%	–
Spełniane normy	SAE 5W40, VW 502 00/505 01	SAE 5W40, VW 502 00/505 01	SAE 10W40, ACEA E6, E7, E9, API CJ-4/SN, CAT ECF-3, ECF-2, ECF-1-a, JASO DH-2	–



Rysunek 4.3. Tester tribologiczny T-05 (fot. własna)



Rysunek 4.4. Schemat pary kinematycznej testera tribologicznego T-05: 1 – czujnik siły, 2 – próbka pierścieniowa, 3 – olej, 4 – zbiornik oleju, 5 – przeciwpróbka, 6 – ramię przenoszące siłę, 7 – czujnik przemieszczenia, F – siła tarcia, P – obciążenie węzła tarcia [86]

Tabela 4.5. Parametry techniczne testera tribologicznego T-05 „rolka-klocek” produkcji ITeE Radom [87]

Parametr	Wartość/typ
Rodzaj ruchu	Ślizgowy jednokierunkowy lub oscylacyjny
Geometria styku	Liniowy lub rozłożony
Nominalna średnica zewnętrzna rolki	35 mm
Nominalna szerokość klocka	6,35 mm
Prędkość poślizgu	Do 5,5 m/s
Częstotliwość oscylacji	Do 8 Hz
Kąt oscylacji	Do 90°
Obciążenie	Do 3150 N
Temperatura podgrzewanego oleju	Do 150°C

Badania stanowiskowe par ciernych w styku rozłożonym i liniowym przeprowadzono na maszynie tribologicznej T-05 w węźle tarcia typu rolka-klocek (rys. 4.3-4.4, tabela 4.5). Główne elementy składowe stanowiska to:

- komputer klasy PC z oprogramowaniem Catman V5.0 do akwizycji danych,
- wzmacniacz pomiarowy Spider8,
- sterownik BT03 mierzący prędkość obrotową, ilość obrotów i temperaturę,
- silnik elektryczny sterowany falownikiem,
- elementy maszyny mocujące parę cierną,
- czujnik siły umożliwiający rejestrację siły tarcia,
- termopara wskazująca temperaturę w obszarze tarcia,
- czujnik przemieszczenia rejestrujący zużycie liniowe przeciwpróbki,
- odważniki służące do zadawania obciążenia węzła tarcia,
- zbiornik oleju,
- układ grzejny do podgrzewania oleju.

Pomiar siły tarcia realizowany jest za pomocą przetwornika HBM model S2, o znamionowej sile 500 N i czułości pomiarowej 2 mV/V. Do pomiaru temperatury użyto termopary firmy Czaki, typ TP-202 z termoelementem typu K (NiCr-NiAl). Przemieszczenie rejestrowano przetwornikiem przemieszczenia HBM z serii WI, o zakresie pomiarowym 2 mm.

Badania mikroskopowe śladów zużycia powstałych podczas pracy par ciernych w styku liniowym zostały przeprowadzone pod mikroskopem Meiji Techno ML7000 z zamontowanym obiektywem o powiększeniu 10x. Zdjęcia wykonano przy pomocy

kamery PCS Instruments Lu1376C-PCI i dedykowanego oprogramowania tej firmy (rys. 4.5).



Rysunek 4.5. Mikroskop optyczny Meiji Techno ML7000 (fot. własna)

Chropowatość powierzchni elementów badanych par ciernych przed i po próbach zmierzono za pomocą profilometru Taylor Hobson Surtronic 3+ (rys. 4.6).



Rysunek 4.6. Profilometr Taylor Hobson Surtronic 3+ (fot. własna)

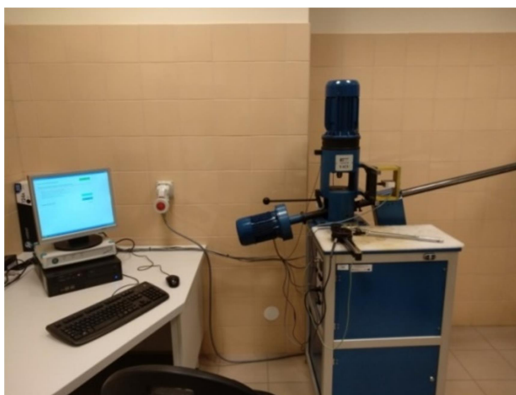
Do pomiaru ubytku masy przeciwpróbek ze stopu łożyskowego użyto wagi analitycznej Radwag WAA 40/160/X/1 o dokładności  $d = 0,01$  mg (rys. 4.7).



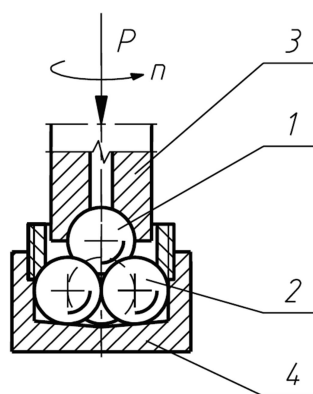
Rysunek 4.7. Waga analityczna Radwag WAA 40/160/X/1 (fot. własna)

Badania właściwości przeciwzatarciowych środków smarowych przed i po badaniach tribologicznych przeprowadzono na stanowisku badawczym T-02U (aparat

czterokulowy) (rys. 4.8, tabela 4.6). Skojarzenie cierne stanowią trzy kulki łożyskowe zamocowane nieruchomo w gnieździe i czwarta kulka we wrzecionie wykonująca ruch obrotowy (rys. 4.9).



Rysunek 4.8. Aparat czterokulowy T-02U (fot. własna)



Rysunek 4.9. Schemat skojarzenia ciernego testera tribologicznego T-02U: 1 – kulka górna, 2 – kulki dolne, 3 – uchwyt kulki górnej, 4 – gniazdo kulek wypełnione badanym olejem, P – obciążenie węzła tarcia, n – prędkość obrotowa silnika [88]

Tabela 4.6. Parametry techniczne aparatu czterokulowego T-02U produkcji ITeE Radom [88]

Parametr	Wartość/typ
Rodzaj ruchu	Ślizgowy lub toczny
Geometria styku	Skoncentrowany, punktowy
Węzeł tarcia	Czterokulowy lub stożek-kule
Obciążenie styku	Zmienne od 0 do 7848 N, z możliwością narastania w sposób ciągły
Sposób smarowania	Zanurzeniowy lub poprzez jednorazowe nakładanie próbki badanego środka smarowego

Para cierna podczas testu zanurzona jest w badanym oleju. Zastosowano kulki łożyskowe ze stali łożyskowej 100Cr6 (tabela 4.7), o średnicy nominalnej 1/2", twardości 60÷65 HRC i chropowatości powierzchni  $R_a = 0,032 \mu\text{m}$ .

Tabela 4.7. Skład chemiczny stali 100Cr6 [89]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe
0,95-1,1%	0,25-0,45%	0,15-0,35%	max 0,025%	max 0,025%	1,3-1,65%	max 0,3%	max 0,3%	reszta

Do oceny wielkości śladu zatarcia kulek wykorzystano lupę Dioptra Turnov z podziałką 0,1 mm i powiększeniu optycznym 10x. Zdjęcia śladów zatarcia na nieruchomych kulkach wykonano przy użyciu mikroskopu optycznego.

## 4.2. Metodyka badawcza

Prace badawcze zostały podzielone na trzy etapy:

1. Badania par ciernych w styku rozłożonym obejmowały próby rozruchu pary w zakresie prędkości ślizgania od 0 do 1 m/s, próby przy ustabilizowanej prędkości ślizgania  $v=1$  m/s w czasie 35 s (początkowa faza współpracy skojarzenia) i próby zużycia pary ciernej w czasie 1000 s. Próby wykonano w zmiennych skokowo naciskach jednostkowych 5, 10, 15, 20 MPa.
2. Badania par ciernych w styku liniowym obejmowały próby rozruchu w zakresie prędkości ślizgania od 0 do 0,7 m/s oraz próby zużycia pary ciernej w czasie 1800 s, przy zmiennych skokowo siłach nacisku 1200, 1800, 2400, 3000 N.
3. Badania właściwości przeciwzatarciowych olejów przed i po badaniach zużycia w parach ciernych w styku liniowym.

Badania stanowiskowe par ciernych w styku rozłożonym i liniowym oraz badania na aparacie czterokulowym przeprowadzono według następujących procedur:

1. Procedura docierania do prób w styku rozłożonym i liniowym – tester T-05:
  - a) Montaż badanej pary ciernej i napełnienie zbiornika olejem.
  - b) Rozruch i obciążenie wężła ciernego, rozpoczęcie pomiaru czasu.
  - c) Zdjęcie obciążenia, zatrzymanie wężła tarcia i demontaż elementów pary ciernej oraz usunięcie oleju z zbiornika.
2. Procedura badawcza prób w styku rozłożonym i liniowym – tester T-05:
  - a) Montaż pary ciernej na stanowisku i napełnienie zbiornika próbką oleju.
  - b) Obciążenie wężła tarcia i zerowanie wskazań czujnika siły.
  - c) Bieg badawczy.
  - d) Zdjęcie obciążenia, usunięcie oleju z zbiornika, demontaż pary ciernej.
3. Procedura badawcza właściwości przeciwzatarciowych olejów smarowych – tester T02U:

- a) Odtłuszczenie i wysuszenie czterech kulek.
- b) Montaż trzech kulek w gnieździe i napełnienie go olejem.
- c) Montaż czwartej kulki w uchwycie i we wrzecionie maszyny.
- d) Złożenie pary ciernej w maszynie i zerowanie wskazań zespołu obciążającego węzeł tarcia.
- e) Podgrzanie oleju w zbiorniku do 40 lub 100°C i wykonanie próby.
- f) Demontaż elementów węzła tarcia i czyszczenie węzła tarcia.

Badania dynamicznych procesów tribologicznych w skojarzeniu ciernym w styku skoncentrowanym i rozłożonym wykonano z zastosowaniem dynamicznego randomizowanego programu badawczego. Zastosowanie tego programu umożliwia zwiększenie efektywności badań poprzez zastosowanie wstępnej informacji o badanym obiekcie i uzyskanych wynikach z opracowanych analiz. Program ten umożliwia randomizację czynników przestrzeni wartości wielkości wejściowych w oparciu o stworzone bloki, których liczba jest równa liczbie punktów przestrzeni czynnikowej. Uzyskane w badaniach wartości wielkości mierzonych wyznaczają istotność wpływu danej badanej wielkości wejściowej na badane wielkości wyjściowe. Powoduje to, że program charakteryzuje się dużą efektywnością badań i jest kompromisem między wymaganiami teorii doświadczeń, a możliwościami badań złożonych układów o dużej liczbie czynników zakłócających [90, 91]. Zmierzone w kolejnych etapach testów wyniki pomiarów poddano analizie statystycznej, co pozwoliło już podczas prowadzenia badań ustalić, czy uzyskane rezultaty pozwalają na formułowanie wniosków decyzyjnych. Wykonane wnioskowanie pozwoliło na podjęcie decyzji o zamknięciu cyklu eksperymentu, jego kontynuacji lub modyfikacji w celu uwzględnienia czynników wpływających w sposób istotny na uzyskiwane wyniki pomiarów. W etapie końcowym wykonano obliczenia statystyczne zmierzające do określenia przedziału ufności i jego poziomu, co pozwoliło na zbudowanie podstaw do wyznaczenia rzeczywistej średniej arytmetycznej mierzonej wielkości i określenia relacji między badanymi wielkościami wejściowymi i wyjściowymi [16].

### **4.3. Badania skojarzeń ciernych w styku konforemnym**

Badania tribologiczne w styku konforemnym (rozłożonym) przeprowadzono z użyciem pary ciernej rolka-klocek. Para cierna składała się z próbki pierścieniowej oraz przeciwpróbki wykonanej ze stopu łożyskowego CuPb30. Stosowano próbki pierścieniowe stalowe z warstwą powierzchniową ulepszoną cieplnie oraz z powłoką

węglową. Elementy pary podczas próby były smarowane olejem: nowym 5W40, zużytym 5W40, biodegradowalnym 10W40 oraz kompozycją PAO8 + MoS<sub>2</sub>. Próby w styku rozłożonym są modelem tribologicznym wężła tarcia wał korbowy - półpanewka silnika spalinowego.

Przeprowadzenie prób w styku konforemnym było poprzedzone docieraniem pary ciernej pod naciskiem jednostkowym 9 MPa z prędkością obrotową silnika 200 obr/min przy smarowaniu obszaru tarcia badanym olejem, w czasie 240 s (dla prób rozruchu i współpracy w warunkach ustalonej prędkości ślizgania). Dla każdego nacisku jednostkowego wykonano trzy powtórzenia, a wynik podano jako wartość średnią z trzech prób. Dla uzyskanych wyników obliczono odchylenie standardowe.

#### 4.3.1. Rozruch pary ciernej w styku konforemnym

Próby rozruchu pary ciernej miały na celu określenie maksymalnego momentu tarcia (momentu rozruchowego) w fazie startu badanej pary przy zmiennych naciskach jednostkowych 5, 10, 15 i 20 MPa. Próbki pierścieniowe rozpędzono z liniowym narastaniem prędkości ślizgania od 0 do 1 m/s (przyspieszenie  $a=0,1 \text{ m/s}^2$ ) (tabela 4.8). Próby zostały przeprowadzone w temperaturze otoczenia  $\sim 20^\circ\text{C}$ .

Tabela 4.8. Parametry pracy testera T-05 w trakcie prób rozruchu w styku rozłożonym

Parametr pracy testera	Wartość parametru
Prędkość ślizgania	0-1 m/s
Nacisk jednostkowy	5, 10, 15, 20 MPa
Objętość oleju	90 ml
Częstotliwość próbkowania	500 Hz
Współczynnik kompresji	1

Parametry zmienne w badaniach rozruchu pary ciernej to naciski jednostkowe i prędkość ślizgania. W trakcie prób rejestrowano w czasie rzeczywistym siłę tarcia i czas trwania próby. Pomiar siły tarcia umożliwił wyliczenie wartości maksymalnego momentu tarcia i wykreślenie przebiegu współczynnika tarcia w funkcji prędkości ślizgania w początkowej fazie rozruchu pary ciernej.

W odniesieniu do rzeczywistego silnika spalinowego próby miały odwzorować warunki pracy w trakcie początkowej fazy rozruchu zimnego silnika.

#### 4.3.2. Próby pary ciernej w warunkach ustalonej prędkości ślizgania

Próby stanowiskowe w ustalonych warunkach prędkości ślizgania miały na celu określenie warunków tarcia w parze ciernej oraz wyznaczenie obszarów stabilizowania



się siły tarcia i temperatury w zależności od kompozycji materiałowej pary ciernej i nacisków jednostkowych (tabela 4.9).

Tabela 4.9. Parametry pracy testera T-05 w trakcie badania pary ciernej w ustalonych warunkach prędkości ślizgania w styku rozłożonym

Parametr pracy testera	Wartość parametru
Prędkość ślizgania	1 m/s
Czas trwania próby	35 s
Nacisk jednostkowy	5, 10, 15, 20 MPa
Objętość oleju	90 ml
Temperatura początkowa	25±1°C
Częstotliwość próbkowania	250 Hz
Współczynnik kompresji	3

Parametry zadawane w trakcie prób to zmienne naciski jednostkowe, stała prędkość ślizgania i czas trwania próby. W trakcie prób w czasie rzeczywistym rejestrowana była siła tarcia i temperatura w obszarze tarcia.

W odniesieniu do rzeczywistego silnika spalinowego próby miały w przybliżeniu odwzorowywać warunki stabilizacji pracy zimnego silnika.

#### 4.3.3. Zużycie pary ciernej w skojarzeniu konforemnym

Próby zużycia miały na celu określenie wpływu kompozycji pary ciernej oraz zmiennych nacisków jednostkowych na zużycie elementów składowych pary: próbki pierścieniowej i przeciwpróbki ze stopu łożyskowego. Głównym celem badań była rejestracja sumarycznego zużycia liniowego elementów pary ciernej i zużycia masowego przeciwpróbki ze stopu łożyskowego (tabela 4.10).

Tabela 4.10. Parametry pracy testera T-05 w trakcie prób zużycia w styku rozłożonym

Parametr pracy testera	Wartość parametru
Prędkość obrotowa silnika	100 obr/min
Czas trwania próby	1000 s
Nacisk jednostkowy	10, 15, 20 MPa
Objętość oleju	90 ml
Temperatura początkowa	25+3°C
Częstotliwość próbkowania	10 Hz
Współczynnik kompresji	25

Przeprowadzenie prób zużycia poprzedzone było docieraniem pary ciernej pod naciskiem jednostkowym 10 MPa, z prędkością obrotową silnika 100 obr/min, przez 180 s, oraz odtłuszczeniem przeciwpróbek i pomiarem ich początkowej masy.

Próby zużycia zostały wykonane dla trzech nacisków jednostkowych wężła tarcia: 10, 15 i 20 MPa. Podczas badań przy nacisku jednostkowym 5 MPa nie uzyskano wiarygodnych, mierzalnych zmian badanych parametrów, stąd po przeprowadzeniu analizy statystycznej wyniki te nie zostały uwzględnione w końcowej analizie. Wielkości zadawane w trakcie prób to naciski jednostkowe, prędkość obrotowa próbki i czas trwania próby. W trakcie prób rejestrowana była siła tarcia, temperatura w obszarze tarcia, wskazania czujnika przemieszczenia oraz czas trwania próby. Próba kończyła się demontażem przeciwpróbki ze stanowiska, odfuszczeniem za pomocą toluenu i pomiarem masy.

Do analizy procesów tribologicznych zostały wyznaczone parametry pomocnicze:

- moment tarcia pod koniec próby – średnia wartość momentu tarcia z 50 ostatnich punktów pomiarowych,
- temperatura w obszarze styku pod koniec próby – średnia wartość temperatury z ostatnich 10 punktów pomiarowych,
- zużycie liniowe przeciwpróbki – różnica pomiędzy wskazaniami czujnika przemieszczenia stanowiąca średnią arytmetyczną z ostatnich 50 punktów pomiarowych i 50 punktów pomiarowych liczonych od momentu osiągnięcia 250 s (1/4 czasu trwania próby),
- ubytek masowy przeciwpróbki  $\Delta m$  – różnica wagi przeciwpróbki przed i po próbie zużycia.

Etapem końcowym prób zużycia w styku rozłożonym był pomiar chropowatości powierzchni roboczych próbek pierścieniowych i współpracujących z nimi powierzchni przeciwpróbek ze stopu łożyskowego CuPb30. Wykonano pomiary wybranych parametrów chropowatości: Ra, Rz, Rq i RSm. Pomiary wykonano wg normy ISO 4287. Odcinek pomiarowy podczas pomiaru próbek pierścieniowych miał długość 4 mm, a w przypadku przeciwpróbek ze stopu łożyskowego - 2,5 mm. Pomiary przeprowadzono w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku ruchu pierścienia.

#### **4.4. Badania skojarzeń ciernych w styku niekonforemnym**

Badania tribologiczne w styku niekonforemnym (liniowym) przeprowadzono w parze cierniej rolka-klocek. Para cierna składała się z próbki pierścieniowej oraz przeciwpróbki w postaci płytki zaworowej (regulatora luzu zaworowego). Zastosowano próbki pierścieniowe stalowe z warstwą powierzchniową ulepszoną cieplnie oraz

regulatory luzu zaworowego w wersji komercyjnej (utwardzanie powierzchniowe) i z ukształtowaną powłoką węglową. Elementy te pracowały w obecności olejów: nowego 5W40, zużytego 5W40, biodegradowalnego 10W40 oraz kompozycji oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub>. Przeprowadzenie prób w styku liniowym było poprzedzone docieraniem pary ciernej pod naciskiem 1500 N, z prędkością obrotową silnika 100 obr/min, przez 30 s. Docieranie każdej pary ciernej odbywało się na próbce badanego oleju.

Próby w styku liniowym są modelem tribologicznym węzła tarcia krzywka wałka rozrządu-popychacz w układzie rozrządu silnika spalinowego.

#### 4.4.1. Rozruch pary ciernej w styku niekonforemnym

Próby rozruchu miały na celu określenie maksymalnego momentu tarcia (momentu rozruchowego) w początkowej fazie rozpędzania pary ciernej w styku liniowym. Wielkości zadawane w trakcie prób to zmienna prędkość ślizgania od 0 do 0,7 m/s i zmienna siła nacisku 1200, 1800, 2400 i 3000 N (tabela 4.11).

Tabela 4.11. Parametry pracy testera T-05 w trakcie prób rozruchu w styku liniowym

Parametr pracy testera	Wartość
Prędkość ślizgania	0-0,7 m/s
Siła nacisku	1200, 1800, 2400, 3000 N
Objętość oleju	90 ml
Częstotliwość próbkowania	100 Hz
Współczynnik kompresji	2

W trakcie prób rejestrowana była siła tarcia w funkcji czasu, na podstawie której obliczono wartości momentu tarcia. Dla każdej siły nacisku wykonano trzy powtórzenia, a wynik badania jest wartością średnią z trzech biegów badawczych.

#### 4.4.2. Zużycie elementów pary ciernej w styku niekonforemnym

Próby zużycia miały na celu wyznaczenie zużycia płytki zaworowej oraz zarejestrowanie parametrów tarcia w parze ciernej w trakcie długotrwałej pracy węzła tarcia. Próby zużycia zostały wykonane dla trzech wartości siły nacisku: 1800, 2400 i 3000 N (tabela 4.12). Badania przeprowadzone przy sile nacisku 1200 N nie pozwoliły uzyskać mierzalnego zużycia przeciwpróbek i tym samym wyniki zarejestrowane dla tego obciążenia nie zostały umieszczone w analizie wyników badań. Próby zużycia dla wszystkich badanych nacisków odbywały się na tej samej próbce badanego oleju i z użyciem jednego pierścienia (procedura zapewniała degradację oleju). Naciski zadawano w kolejności rosnącej. Dla każdej wartości siły nacisku wykonano trzy powtórzenia, a wynik badania to wartość średnia z trzech biegów badawczych.

Tabela 4.12. Parametry pracy testera T-05 w trakcie prób zużycia w styku liniowym

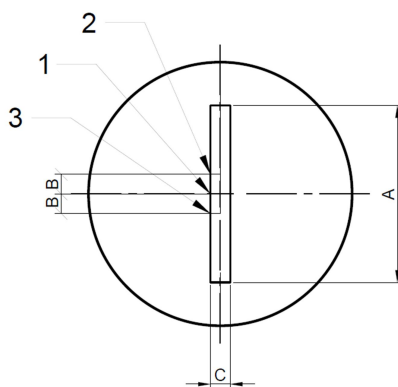
Parametr pracy testera	Wartość
Prędkość obrotowa silnika	100 obr/min
Czas trwania próby	1800 s
Siła nacisku	1800, 2400, 3000 N
Objętość oleju	90 ml
Temperatura początkowa	25+3°C
Częstotliwość próbkowania	10 Hz
Współczynnik kompresji	25

Parametry zadawane w trakcie prób zużycia w styku niekonforemnym to zmienna siła nacisku, stały czas trwania próby oraz prędkość obrotowa próbki pierścieniowej. W trakcie prób rejestrowana była siła tarcia i temperatura w obszarze styku pary ciernej.

Podobnie jak w przypadku badań w styku rozłożonym do oceny procesów tarcia posłużono się parametrami pomocniczymi:

- siła tarcia pod koniec próby – średnia wartość siły tarcia z 50 ostatnich punktów pomiarowych,
- temperatura pod koniec próby – średnia wartość temperatury w obszarze tarcia z ostatnich 10 punktów pomiarowych.

Po próbach zużycia wykonano pomiary szerokości śladu zużycia na płytkach zaworowych pod mikroskopem. Ślad zużycia został zmierzony w trzech przekrojach, pierwszy w środku długości śladu wytarcia oraz drugi i trzeci symetrycznie względem pierwszego, w odległości 1 mm (rys. 4.10).



Rysunek 4.10. Pomiar śladu zużycia pod mikroskopem ML7000: 1, 2, 3 – kolejność wykonywania pomiarów, A – długość śladu wytarcia na przeciwpróbce (6,35 mm), B – odległość pomiaru od środka śladu zużycia (1 mm), C – szerokość śladu zużycia (opracowanie własne)

Dla każdego biegu badawczego, z trzech wartości odczytanych ze zdjęć obliczono średnią arytmetyczną. Jako wynik próby w danych warunkach pomiarowych

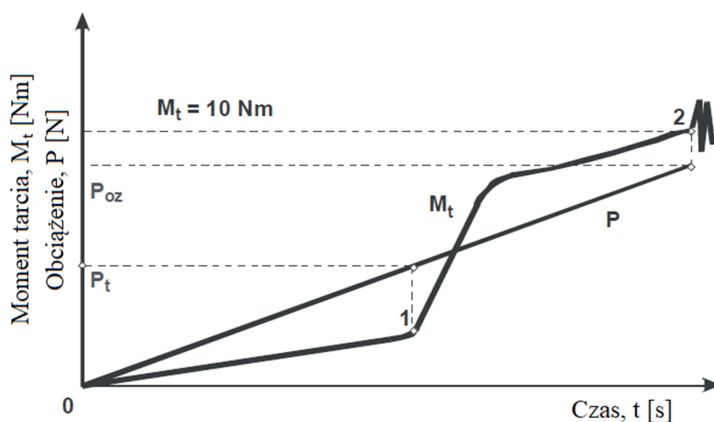
(rodzaj oleju, typ powłoki, siła nacisku) przyjęto wartość średnią z trzech biegów badawczych.

Ostatnim etapem badań par ciernych w styku liniowym był pomiar chropowatości powierzchni roboczych próbek pierścieniowych ulepszanych cieplnie oraz współpracujących z nimi powierzchni płytek zaworowych (wg procedury stosowanej przy pomiarach elementów par ciernych w styku konforemnym).

#### 4.5. Badania właściwości przeciwzatarciowych środków smarowych

Ocenę zmian właściwości przeciwzatarciowych środków smarowych w wyniku procesów tribologicznych w badanych parach ciernych przeprowadzono na aparacie czterokulowym. Badania właściwości przeciwzatarciowych wykonano z olejami przed i po badaniach w styku liniowym w parach ciernych z płytkami komercyjnymi i z płytkami z powłoką a-C:H:W.

Na aparacie czterokulowym rejestrowano przebiegi momentu tarcia w funkcji obciążenia węzła tarcia, które umożliwiły wyznaczenie obciążenia zacierającego  $P_t$  wg PN-76/C-04147 oraz obliczenie granicznego nacisku zatarcia  $p_{oz}$  wg metody ITeE-PIB (wzór 1) (rys. 4.11).



Rysunek 4.11. Modelowy przebieg momentu tarcia i obciążenia w funkcji czasu próby na aparacie czterokulowym: 1 – punkt inicjacji zacierania, 2 – punkt zatarcia węzła tarcia, P – obciążenie węzła tarcia,  $P_t$  – obciążenie zacierające,  $P_{oz}$  – obciążenie zatarcia,  $M_t$  – moment tarcia [88]

$$p_{oz} = 0,52 \frac{P_{oz}}{d^2} \quad (1)$$

Badania wykonano metodą dynamiczną, w której liniowo rosło obciążenie węzła tarcia od 0 do 7200 N w dwóch ustalonych temperaturach węzła tarcia – 40°C i 100°C (tabela 4.13). Za wynik badania przyjmowano średnią arytmetyczną z trzech powtórzeń, nie różniących się od ich średniej arytmetycznej o więcej niż 10% [88].

Średnica śladu zużycia na kulkach d była mierzona w dwóch prostopadłych do siebie płaszczyznach, za pomocą lupy o podziałce 0,1 mm.

Tabela 4.13. Parametry pracy testera T-02U w trakcie badań właściwości przeciwzatarciowych olejów

<b>Parametr pracy testera</b>	<b>Wartość parametru</b>
Prędkość poślizgu	0,19 m/s
Czas trwania próby	18 s
Prędkość narastania obciążenia	409 N/s
Obciążenie początkowe węzła tarcia	0 N
Obciążenie maksymalne węzła tarcia	7200 ± 100 N
Temperatura początkowa	40 lub 100°C
Objętość oleju	30 ml
Częstotliwość próbkowania	75 Hz
Współczynnik kompresji	1

Parametry zadawane w trakcie prób to obciążenie węzła tarcia, czas trwania próby, temperatura początkowa oraz prędkość poślizgu. W trakcie prób rejestrowany był moment tarcia, temperatura pary ciernej i obciążenie węzła tarcia.

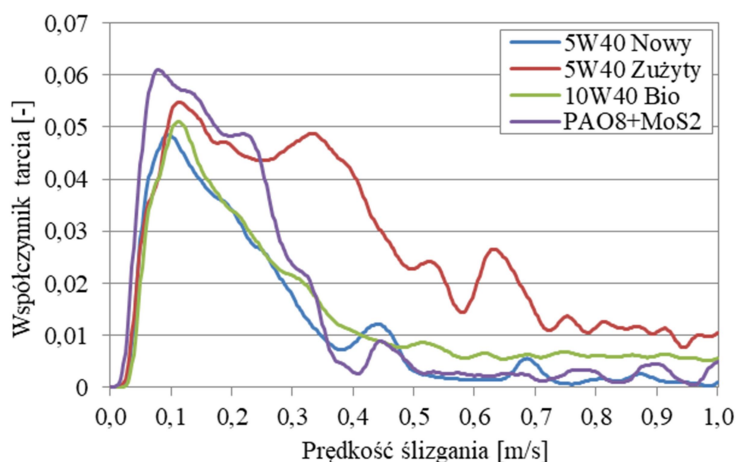
## 5. WYNIKI BADAŃ I ICH INTERPRETACJA

### 5.1. Procesy tribologiczne w węzłach ciernych o styku konforemnym

#### 5.1.1. Analiza warunków tarcia w parze ciernej

##### Rozruch pary ciernej

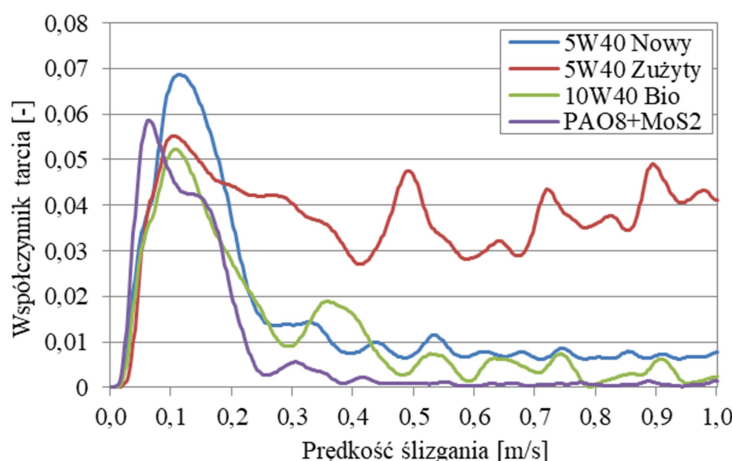
W czasie rozruchu pary ciernej zachodzą intensywne procesy tarcia, które są efektem dostosowywania się warstwy powierzchniowej elementów pary do zmiennych warunków obciążenia, generowanych głównie przez wzrost prędkości ślizgania. W tej fazie pracy pary ciernej jednym z najistotniejszych parametrów eksploatacyjnych jest maksymalny moment tarcia. Podczas badań rozruchu par ciernych zarejestrowano przebiegi siły tarcia w funkcji zmiennej prędkości ślizgania, które umożliwiły obliczenie współczynnika tarcia i maksymalnej wartości momentu tarcia (momentu rozruchowego) w badanych skojarzeniach par ciernych (rys. 5.1-5.2).



Rysunek 5.1. Współczynnik tarcia w parach ciernych z pierścieniami ulepszanymi cieplnie w funkcji prędkości ślizgania i rodzaju oleju smarującego, nacisk jednostkowy 20 MPa

Zarejestrowane przebiegi współczynnika tarcia w badanych parach ciernych wykazały istotny wzrost oporów tarcia w czasie rozruchu pary, aż do osiągnięcia maksymalnej wartości. Po tym etapie współpracy skojarzenia obserwuje się istotny spadek wartości współczynnika tarcia. W parach ciernych z próbkami pierścieniowymi ulepszanymi cieplnie i smarowanymi olejem nowym 5W40, olejem biodegradowalnym 10W40 i olejem PAO8 z dodatkiem MoS<sub>2</sub> zarejestrowane przebiegi współczynnika tarcia mają podobny charakter (rys. 5.1). Po skokowym wzroście wartości współczynnika tarcia osiągają maksimum po czym następuje szybki ich spadek i przejście w fazę stabilizacji (poniżej 0,005) wraz ze wzrostem prędkości ślizgania (powyżej 0,4-0,5 m/s). W przypadku pary ciernej z próbką ulepszaną cieplnie

i smarowaniu olejem użytym 5W40 widoczna jest tendencja do późniejszego spadku współczynnika tarcia (prędkość ślizgania powyżej 0,7 m/s) i jego stabilizacji na wyższym poziomie (0,01) w porównaniu do pozostałych badanych olejów. W zakresie prędkości ślizgania do 0,2 m/s (początkowa faza ruchu pary ciernej) najwyższą wartość współczynnika tarcia zmierzono w parze ciernej smarowanej olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu i wyniosła ona 0,061. Para cierna smarowana olejem użytym 5W40 osiągnęła wartość 0,055, a para smarowana olejem biodegradowalnym 10W40 – 0,051. Najniższą wartość współczynnika tarcia podczas rozruchu wyznaczono dla pary ciernej smarowanej olejem nowym 5W40 – 0,049.



Rysunek 5.2. Współczynnik tarcia w parach ciernych z pierścieniami z powłoką a-C:H:W w funkcji prędkości ślizgania i rodzaju oleju smarującego, nacisk jednostkowy 20 MPa

Przebiegi zmian współczynnika tarcia w czasie badania rozruchu par ciernych z próbkami pierścieniowymi z powłoką a-C:H:W zarejestrowane dla oleju nowego 5W40, biodegradowalnego 10W40 oraz oleju bazowego PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu mają podobny charakter jak w parach z próbkami pierścieniowymi ulepszanymi cieplnie (rys. 5.2). Po intensywnym wzroście wartości współczynnika tarcia następuje jego spadek poniżej 0,01 w parach smarowanych olejem nowym 5W40 i olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub> przy prędkości ślizgania powyżej 0,3 m/s, natomiast w parze smarowanej olejem biodegradowalnym 10W40 przy prędkości powyżej 0,5 m/s. W skojarzeniu ciernym smarowanym olejem użytym 5W40 występuje nieznaczny spadek współczynnika tarcia po przekroczeniu wartości maksymalnej i brak jest stabilizacji procesów tarcia w tej fazie ruchu pary ciernej, a można nawet obserwować powolny wzrost oporów tarcia wraz ze wzrostem prędkości ślizgania. Ten przebieg zmian współczynnika tarcia jest charakterystyczny dla



wszystkich powtórzeń dla tego skojarzenia. Najwyższą wartość współczynnika tarcia w trakcie rozruchu osiągnęła para cierna smarowana olejem nowym 5W40 – 0,069, następnie olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub> – 0,059, olejem zużyтым 5W40 – 0,055, a najniższą smarowana olejem biodegradowalnym 10W40 – 0,052.

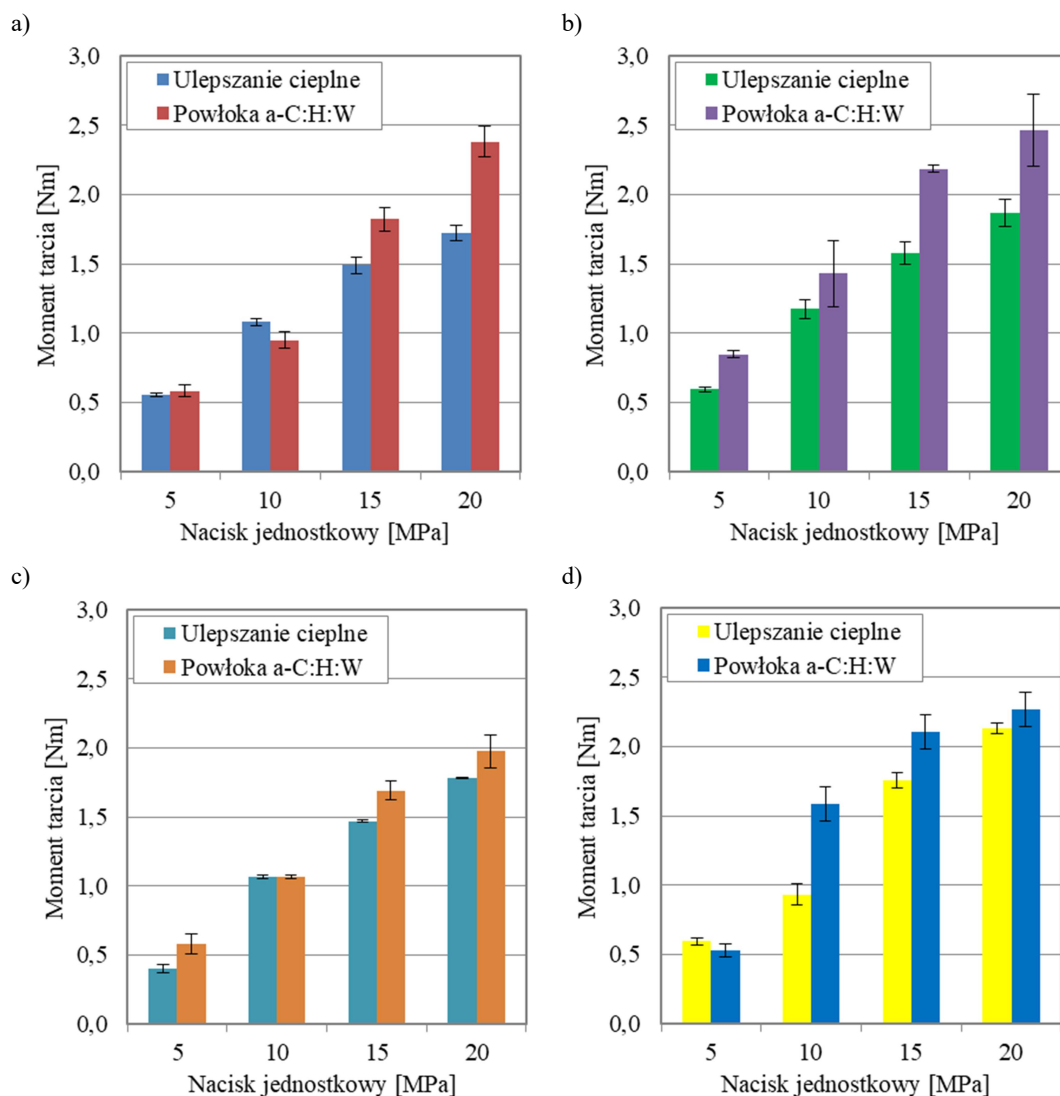
Tabela 5.1. Moment rozruchowy podczas rozruchu par ciernych w styku rozłożonym [Nm]

Kompozycja pary ciernej								
Nacisk jednostkowy [MPa]	Próbka pierścieniowa ulepszana cieplnie – przeciwpróbka CuPb30				Próbka pierścieniowa z powłoką a-C:H:W – przeciwpróbka CuPb30			
	Rodzaj oleju							
	5W40 Nowy	5W40 Zużyty	10W40 Bio	PAO8 + MoS <sub>2</sub>	5W40 Nowy	5W40 Zużyty	10W40 Bio	PAO8 + MoS <sub>2</sub>
5	0,55	0,59	0,40	0,59	0,58	0,85	0,58	0,53
10	1,08	1,18	1,07	0,93	0,95	1,43	1,07	1,59
15	1,49	1,58	1,47	1,76	1,82	2,18	1,69	2,11
20	1,72	1,87	1,78	2,13	2,38	2,46	1,97	2,27

Zarejestrowane wartości siły tarcia w początkowej fazie rozruchu pary ciernej pozwoliły na obliczenie wartości momentu rozruchowego w zależności od nacisku jednostkowego w obszarze styku elementów skojarzenia. Najniższy moment tarcia przy maksymalnym nacisku jednostkowym w parach z próbkami pierścieniowymi ulepszanymi cieplnie został zarejestrowany przy smarowaniu pary ciernej olejem nowym 5W40 – 1,72 Nm, a najwyższy przy smarowaniu olejem bazowym PAO8 z dodatkiem MoS<sub>2</sub> – 2,13 Nm. W parach ciernych z powłoką węglową najniższy moment tarcia przy nacisku jednostkowym 20 MPa wyznaczono w parze ciernej smarowanej olejem biodegradowalnym 10W40 i wynosił on 1,97 Nm, a najwyższy przy smarowaniu olejem zużyтым 5W40 – 2,46 Nm (tabela 5.1).

Zarówno w parach ciernych z próbkami pierścieniowymi ulepszanymi cieplnie, jak i z powłoką węglową wraz ze zwiększaniem nacisku jednostkowego występuje wzrost wartości momentu tarcia podczas startu pary ciernej. Zastosowanie powłoki węglowej na próbce pierścieniowej w parze ciernej smarowanej olejem nowym 5W40 skutkowało w większości przypadków wzrostem maksymalnego momentu tarcia w trakcie rozruchu względem pary ciernej z próbką bez powłoki. Wyjątkiem były próby przy naciskach jednostkowych 10 MPa, w których zarejestrowany moment tarcia jest o 12,2% niższy w przypadku pary z próbką z powłoką a-C:H:W (rys. 5.3a). Różnice pomiędzy wartościami momentu tarcia mierzonymi w parze z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie i w parze z próbką z powłoką a-C:H:W rosną wraz ze wzrostem

nacisku jednostkowego. Przy nacisku jednostkowym 15 MPa zarejestrowano wzrost momentu rozruchowego o 22,4% względem pary ciernej z próbką ulepszaną cieplnie, a przy nacisku jednostkowym 20 MPa wzrost ten sięga 38,3%.



Rysunek 5.3. Moment rozruchowy w parach ciernych z próbkami ulepszanymi cieplnie i z powłoką a-C:H:W w funkcji nacisków jednostkowych przy smarowaniu olejami: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS<sub>2</sub>

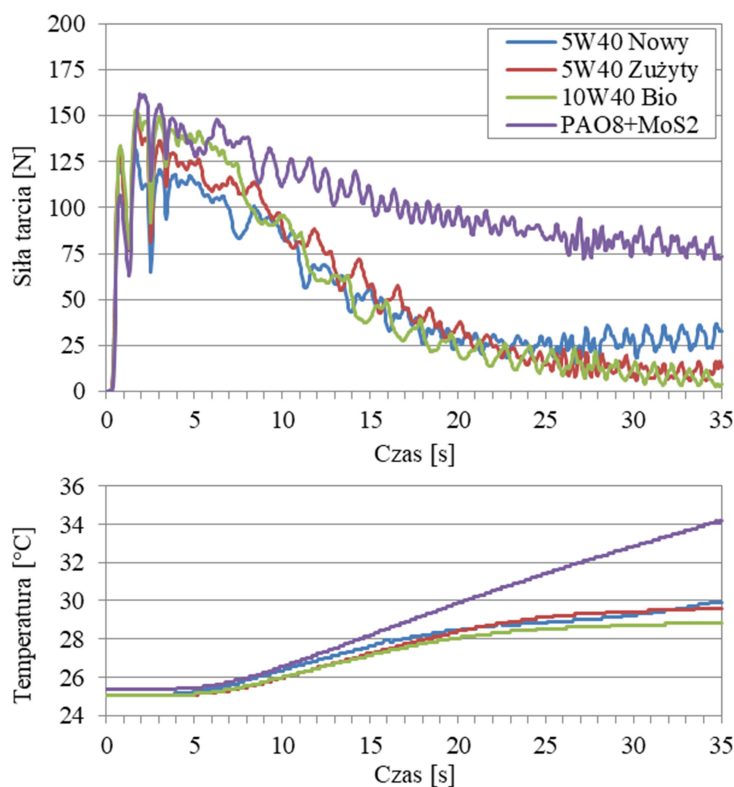
W przypadku smarowania pary ciernej olejem zużytym 5W40 zastosowanie powłoki spowodowało wzrost oporów ruchu dla wszystkich badanych nacisków jednostkowych, kolejno o 42,8%, 21,5%, 38,2% i 31,8% względem pary z próbką bez powłoki a-C:H:W (rys. 5.3b). Wzrost wartości maksymalnego momentu rozruchowego w parach ciernych z próbkami z powłoką węglową występuje także podczas smarowania pary olejem biodegradowalnym 10W40 (rys. 5.3c). Podczas pracy z naciskiem jednostkowym 10 MPa maksymalny moment tarcia był niemal identyczny

dla obu rodzajów próbek. W parze ciernej smarowanej olejem bazowym PAO8 z dodatkiem MoS<sub>2</sub> z próbką z powłoką a-C:H:W zarejestrowano niższą o 11% wartość momentu rozruchowego przy nacisku jednostkowym 5 MPa w porównaniu do pary z próbką ulepszaną cieplnie (rys. 5.3d). Przy wyższych wartościach nacisków jednostkowych w parze z próbką z powłoką węglową zmierzono wyższe wartości momentu tarcia niż w parze z próbką bez powłoki. Największa różnica pomiędzy momentem rozruchowym w parze ciernej z próbką bez powłoki i z powłoką węglową wystąpiła przy nacisku jednostkowym 10 MPa i wyniosła 0,66 Nm. Stanowi to wzrost o 70,2% względem pary z próbką ulepszaną cieplnie. Wraz ze wzrostem nacisku jednostkowego na elementy węzła ciernej maleje różnica pomiędzy porównywanymi wartościami momentu tarcia dla badanych ukształtowanych warstw powierzchniowych próbek pierścieniowych pracujących w obecności oleju PAO8 z dodatkiem MoS<sub>2</sub>.

### **Procesy tarcia w parze ciernej przy ustalonej prędkości ślizgania**

Przeprowadzona w ustalonych warunkach prędkości ślizgania współpraca par ciernych pozwoliła wyznaczyć charakterystyczne przebiegi siły tarcia i temperatury w funkcji czasu trwania próby i kompozycji pary ciernej (rodzaju czynnika smarującego i warstwy powierzchniowej próbek pierścieniowych – ulepszanie cieplne, powłoka a-C:H:W). Analizując uzyskane zmiany siły tarcia przy naciskach jednostkowych 20 MPa w parach z próbkami pierścieniowymi ulepszanymi cieplnie smarowanych olejem nowym 5W40, olejem zużytym 5W40 i olejem biodegradowalnym 10W40 można stwierdzić, że zmiany są porównywalne dla tych skojarzeń (rys. 5.4). Wartość siły tarcia pod koniec próby w przypadku pary ciernej smarowanej olejem biodegradowalnym 10W40 kształtuje się na poziomie 6,8 N, smarowanej olejem zużytym 5W40 osiąga wartość 10,4 N, a stabilizacja siły tarcia w przypadku tych par ciernych następuje po ok. 25 s od rozpoczęcia próby. W parze smarowanej olejem nowym 5W40 stabilizacja wartości siły tarcia następuje wcześniej, po ok. 19 s pracy, na poziomie 29 N. Tendencje tych zmian znajdują również odzwierciedlenie w zmierzonych temperaturach w obszarze tarcia pary ciernej, w których podobne przebiegi zmian temperatury w obszarze tarcia są rejestrowane w parach smarowanych olejami 5W40 (nowy, zużyty), przy czym w końcowej fazie próby temperatura w parze smarowanej olejem nowym rośnie. Wartość temperatury w obszarze tarcia w parze smarowanej olejem nowym 5W40 pod koniec próby wyniosła 29,9°C i była o 0,3°C wyższa niż w smarowanej olejem zużytym 5W40. Najniższe wartości temperatury w obszarze

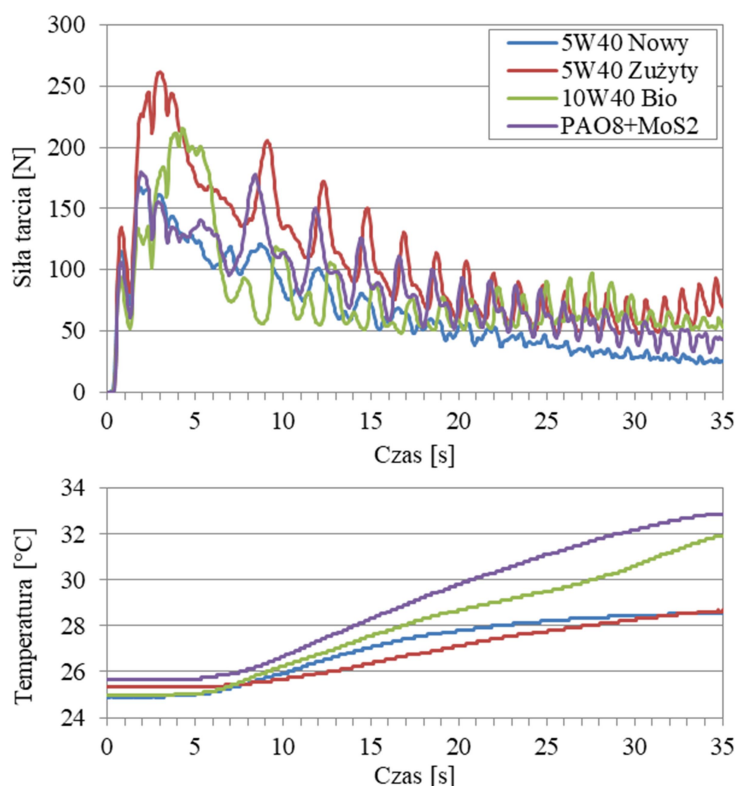
tarcia występują przy smarowaniu obszaru tarcia olejem biodegradowalnym 10W40 – 28,8°C. Smarowanie kompozycją olejową PAO8 + MoS<sub>2</sub> powoduje spowolnienie stabilizacji procesów tarcia w parze ciernej. Siła tarcia stabilizuje się pod koniec próby i osiąga średnią 77,9 N – najwyższą spośród badanych par ciernych z próbkami pierścieniowymi ulepszanymi cieplnie. W parze ciernej smarowanej olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub> zmierzono najwyższy przyrost temperatury w obszarze tarcia badanych par ciernych i brak jest stabilizacji temperaturowej w trakcie trwania próby. Para cierna z próbką ulepszaną cieplnie smarowana olejem bazowym z dwusiarczkiem molibdenu pod koniec próby osiągnęła temperaturę powyżej 34°C (rys. 5.4).



Rysunek 5.4. Siła tarcia i temperatura w obszarze tarcia par ciernych w funkcji czasu i rodzaju oleju – próbki pierścieniowe ulepszane cieplnie, nacisk jednostkowy 20 MPa

Zarejestrowane charakterystyki siły tarcia w parach ciernych z próbkami pierścieniowymi z powłoką a-C:H:W wykazują bardziej nieuporządkowane przebiegi w porównaniu do zmian rejestrowanych w parach z próbkami ulepszanymi cieplnie (rys. 5.5). W początkowej fazie ruchu siła tarcia osiąga również wyższe wartości szczytowe, w porównaniu do sił tarcia w parach z próbkami pierścieniowymi ulepszanymi cieplnie (rys. 5.4). Obserwuje się także znacznie większe wahania siły tarcia podczas smarowania olejem zużytym 5W40, olejem biodegradowalnym 10W40 i kompozycją oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub>. W tych warunkach obciążenia najstabilniej

pracowała para cierna smarowana olejem nowym 5W40. Siła tarcia pod koniec prób w parze cierniej smarowanej olejem nowym 5W40 stabilizuje się na poziomie 26,3 N po ok. 32 s. Nieco wyższe wartości oporów tarcia wystąpiły w parze smarowanej olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu – 43,7 N (stabilizacja po 32 s) i olejem biodegradowalnym 10W40 – 55,6 N (stabilizacja po 15 s). Największe opory tarcia pod koniec próby wyznaczono w parze cierniej pracującej w obecności oleju zużytego 5W40 – 72,3 N, ze stabilizacją po 22 s i następnie z trendem wzrostowym od 32 s.



Rysunek 5.5. Siła tarcia i temperatura w obszarze tarcia par ciernych w funkcji czasu i rodzaju oleju – próbki pierścieniowe z powłoką a-C:H:W, nacisk jednostkowy 20 MPa

Temperatura w obszarze tarcia w parach ciernych z próbkami pierścieniowymi z powłoką a-C:H:W jest zauważalnie rozrzuczona pod koniec próby, w zależności od zastosowanego czynnika smarującego. Przebiegi temperatury w parach smarowanych olejem nowym i zużytym 5W40 charakteryzuje duże podobieństwo i pod koniec próby temperatura w obu przypadkach osiąga wartość na poziomie 28,6°C. Natomiast zastosowanie oleju biodegradowalnego 10W40 i oleju bazowego PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu do smarowania par ciernych wpływa na wzrost temperatury w obszarze tarcia o kilka stopni do poziomu powyżej 31°C.

Wartość siły tarcia wyznaczona pod koniec prób w ustalonych warunkach prędkości ślizgania w parze ciernej z próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W smarowanej olejem nowym 5W40 nieznacznie spadła względem pary ciernej z próbką ulepszaną cieplnie (redukcja o 9,3%). W przypadku pary ciernej smarowanej olejem zużyтым 5W40 wystąpił niemal siedmiokrotny wzrost wartości siły tarcia w parze z próbką z powłoką węglową (72,3 N) w stosunku do pary z próbką ulepszaną cieplnie (10,4 N). Podobne zjawisko wystąpiło w przypadku pary ciernej pracującej w obecności oleju biodegradowalnego 10W40 – wzrost o 717,6% względem pary z próbką ulepszaną cieplnie. W przypadku pary ciernej z próbką z powłoką a-C:H:W smarowaną olejem bazowym z dodatkiem dwusiarczku molibdenu siła tarcia pod koniec próby zmniejszyła się o 43,9% względem pary ciernej z próbką ulepszaną cieplnie (rys. 5.4-5.5).

Różnica temperatury w obszarze tarcia pary ciernej z próbką pierścieniową z powłoką węglową smarowanej olejem biodegradowalnym 10W40 w porównaniu do temperatury w parze z próbką ulepszaną cieplnie wynosi niemal trzy stopnie. Temperatury uzyskane podczas pracy par ciernych z próbkami z powłoką węglową w obecności oleju nowego i zużytego 5W40 są niższe o 1-1,3°C względem par ciernych z próbkami ulepszanymi cieplnie. Pary cierne smarowane olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu osiągają najwyższe wartości temperatur spośród badanych par ciernych, zarówno w parach z próbkami ulepszanymi cieplnie (rys. 5.4) jak i z powłoką a-C:H:W (rys. 5.5) i wynoszą odpowiednio 34,1 i 32,9°C.

Zarejestrowane w trakcie prób w ustalonych warunkach prędkości ślizgania przebiegi siły tarcia i temperatury pozwoliły na opisanie warunków tarcia w zależności od nacisków jednostkowych w parze ciernej i jej kompozycji (tabela 5.2).

Siła tarcia w parze ciernej smarowanej olejem nowym 5W40 jest znacząco niższa w parze z próbką z powłoką węglową w zakresie nacisków jednostkowych 5-10 MPa w stosunku do pary z próbką ulepszaną cieplnie (rys. 5.6a). Natomiast wzrost nacisku jednostkowego do wartości 15 i 20 MPa powoduje zmianę trendu i w tych warunkach występuje istotny wzrost wartości siły tarcia w parze ciernej z powłoką. Jest ona wówczas wyższa w porównaniu do pary z próbką bez powłoki o 16,2 i 32,8 N (wzrost odpowiednio o 65 i 113%). Zastosowanie powłoki węglowej na próbce pierścieniowej w parze smarowanej olejem zużyтым 5W40 powoduje istotne różnice w wartości siły tarcia (rys. 5.6b). Przy nacisku jednostkowym 5 MPa siła tarcia w parze ciernej z próbką bez powłoki osiągała wartości rzędu 0,5 N, podczas gdy para cierna z próbką z powłoką a-C:H:W generowała opory ruchu na poziomie 8,2 N.

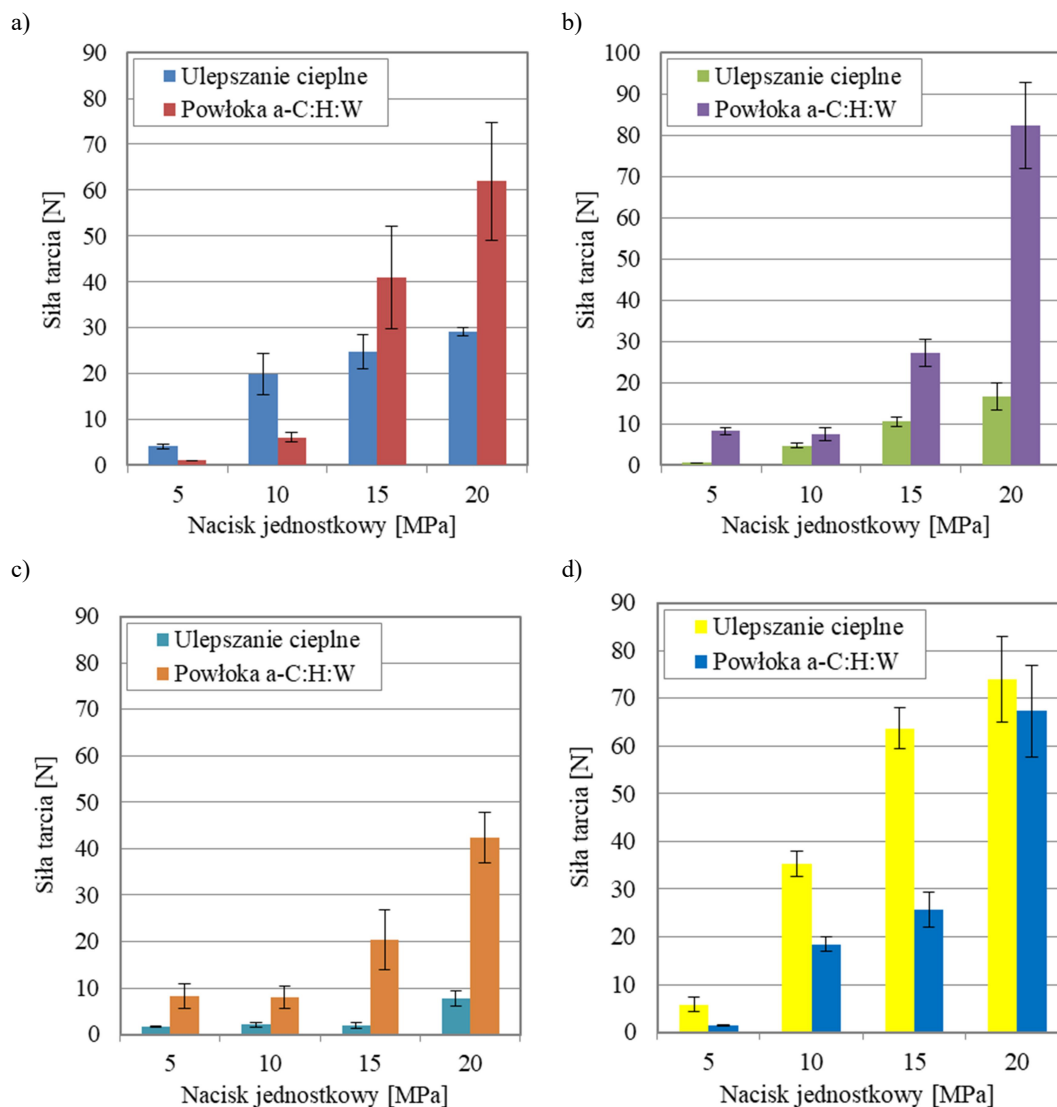
Tabela 5.2. Siła tarcia i temperatura w obszarze tarcia w zależności od kompozycji pary ciernej i nacisku jednostkowego w ustalonych warunkach prędkości ślizgania ( $v=1$  m/s,  $t=35$  s)

Kompozycja pary ciernej								
Nacisk jednostkowy [MPa]	Próbka pierścieniowa ulepszana cieplnie – przeciwpróbka CuPb30				Próbka pierścieniowa z powłoką a-C:H:W – przeciwpróbka CuPb30			
	Rodzaj oleju							
	5W40 Nowy	5W40 Zużyty	10W40 Bio	PAO8 + MoS <sub>2</sub>	5W40 Nowy	5W40 Zużyty	10W40 Bio	PAO8 + MoS <sub>2</sub>
Siła tarcia [N]								
5	4,0	0,5	1,6	5,8	1,0	8,2	8,3	1,4
10	19,9	4,7	2,1	35,3	6,1	7,6	8,0	18,4
15	24,8	10,5	1,9	63,7	40,9	27,1	20,4	25,7
20	29,1	16,7	7,8	74,0	61,9	82,4	42,4	67,3
Temperatura [°C]								
5	25,0	25,5	25,1	26,3	24,6	25,7	24,9	26,4
10	27,3	27,3	26,3	29,6	25,4	25,8	26,0	28,3
15	28,9	28,9	27,8	32,2	28,3	28,0	29,2	30,3
20	30,3	30,4	29,1	33,7	31,3	29,7	30,8	33,8

Para cierna smarowana olejem użytym 5W40 współpracująca z próbką ulepszaną cieplnie wykazuje łagodny, liniowy przyrost wartości wraz ze wzrostem nacisku jednostkowego działającego na węzeł tarcia. Wartości uzyskane dla próbki z powłoką węglową przyrastają gwałtownie po przekroczeniu nacisku jednostkowego 10 MPa. Przy nacisku jednostkowym 20 MPa wartość siły tarcia w parze ciernej z próbką z powłoką jest pięciokrotnie wyższa niż w parze z próbką ulepszaną cieplnie i wynosi 82,4 N (rys. 5.6b). Siła tarcia w parze ciernej z próbką ulepszaną cieplnie przy smarowaniu olejem biodegradowalnym 10W40 przyjmuje wartości 1,6-2,1 N w zakresie nacisków jednostkowych 5-15 MPa (rys. 5.6c). Przy maksymalnej wartości nacisku wartość siły dla tej pary ciernej rośnie do 7,8 N. Można przyjąć, że para cierna z próbką bez powłoki we współpracy z olejem biodegradowalnym 10W40 pracuje w korzystnych warunkach smarowania. Świadczy o tym niska wartość siły tarcia pod koniec próby w porównaniu do par smarowanych pozostałymi olejami, szczególnie podczas pracy z naciskami jednostkowymi 10-20 MPa.

Para z próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W smarowana olejem biodegradowalnym 10W40 wykazuje kilkukrotnie wyższe wartości siły tarcia dla wszystkich badanych nacisków jednostkowych węzła tarcia względem pary z próbkami ulepszanymi cieplnie. Wartości siły tarcia przy naciskach jednostkowych 15 i 20 MPa

są najniższymi wartościami spośród badanych par ciernych z próbkami z powłoką węglową smarowanych badanymi olejami.



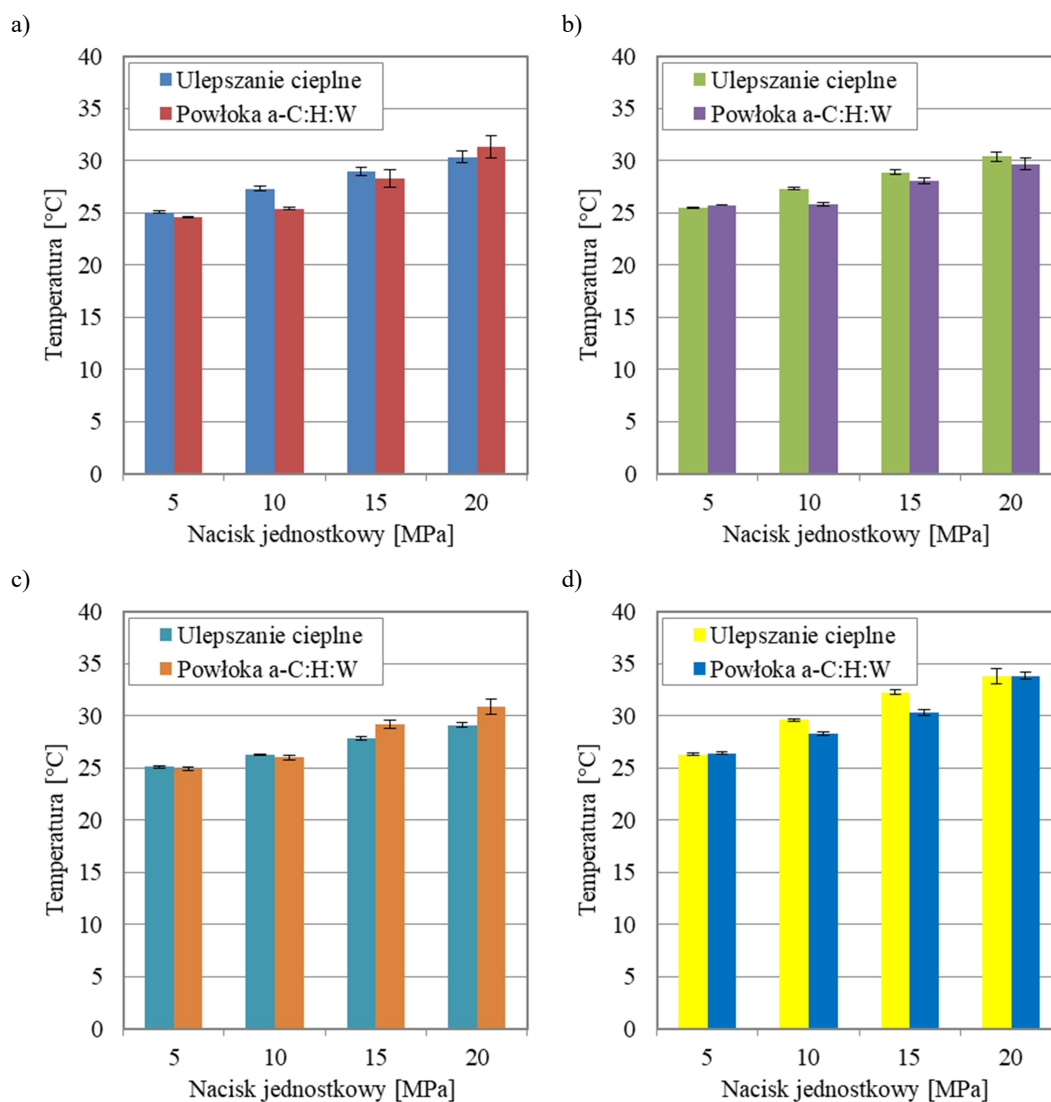
Rysunek 5.6. Siła tarcia w parach ciernych w zależności od kompozycji pary cierniej i rodzaju oleju przy prędkości ślizgania 1 m/s a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS<sub>2</sub>, (t=35 s)

Para cierna smarowana olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu charakteryzuje się niższymi wartościami siły tarcia po zastosowaniu próbki z powłoką węglową (rys. 5.6d). Zależność ta jest widoczna dla wszystkich czterech nacisków jednostkowych. W tym skojarzeniu pary cierniej zastosowanie powłoki a-C:H:W wpływa korzystnie na warunki tarcia w końcowej fazie próby.

Ustawiając siły tarcia uzyskane dla badanych olejów pracujących w parach ciernych z próbkami ulepszanymi cieplnie w kolejności od najwyższych wartości siły tarcia do najniższych otrzymuje się: kompozycję olej bazowy PAO8 + MoS<sub>2</sub>, olej nowy



5W40, olej zużyty 5W40 oraz olej biodegradowalny 10W40. Prawidłowość ta występuje podczas pracy z naciskami 10, 15 oraz 20 MPa. Przy naciskach 5 MPa kolejność oleju biodegradowalnego 10W40 i zużytego 5W40 została zamieniona. Wartości sił tarcia, nacisków jednostkowych i rodzaju oleju smarującego nie da się uporządkować w podobny sposób w przypadku par ciernych z próbkami z powłoką a-C:H:W.



Rysunek 5.7. Temperatura w obszarze tarcia w zależności od kompozycji pary cierniej i rodzaju oleju przy prędkości ślizgania 1 m/s przy smarowaniu olejami: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS<sub>2</sub>, (t=35 s)

Drugim parametrem mierzonym w warunkach ustabilizowanej prędkości ślizgania była temperatura w obszarze styku pary cierniej pierścieni - wycinek panewki łożyskowej. Zastosowanie pierścienia z powłoką węglową w parze cierniej smarowanej olejem nowym 5W40 spowodowało obniżenie temperatury w stosunku do pary

z pierścieniem ulepszanym cieplnie przy naciskach jednostkowych 5, 10 i 15 MPa (rys. 5.7a). Natomiast wzrost temperatury pod koniec próby zarejestrowano podczas pracy z naciskiem 20 MPa. W przypadku zastosowania oleju zużytego 5W40 para cierna pracująca z pierścieniem z powłoką węglową osiąga niższe temperatury pod koniec próby w porównaniu do pary cierniej z pierścieniem ulepszanym cieplnie (rys. 5.7b). Nieznacznie wyższą temperaturę w obszarze tarcia zanotowano jedynie przy pracy z naciskiem jednostkowym 5 MPa. Temperatury w obszarze tarcia skojarzenia ciernego smarowanego przy użyciu oleju biodegradowalnego 10W40 przy naciskach 5 i 10 MPa są niemal identyczne dla obu typów próbek pierścieniowych (rys. 5.7c). Wraz ze wzrostem nacisków jednostkowych (15, 20 MPa) zaobserwowano wzrost temperatur w obszarze tarcia w parze cierniej z próbką pierścieniową z powłoką węglową. Temperatura w obu badanych skojarzeniach par ciernych smarowanych olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu przy nacisku 5 MPa jest niemal identyczna (rys. 5.7d). Identyczne temperatury w obszarze tarcia obu rodzajów próbek pierścieniowych zarejestrowano także przy najwyższym badanym nacisku jednostkowym 20 MPa. Wartości zarejestrowane przy naciskach 10 i 15 MPa są niższe w parze cierniej z próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W, niż w przypadku pary z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie.

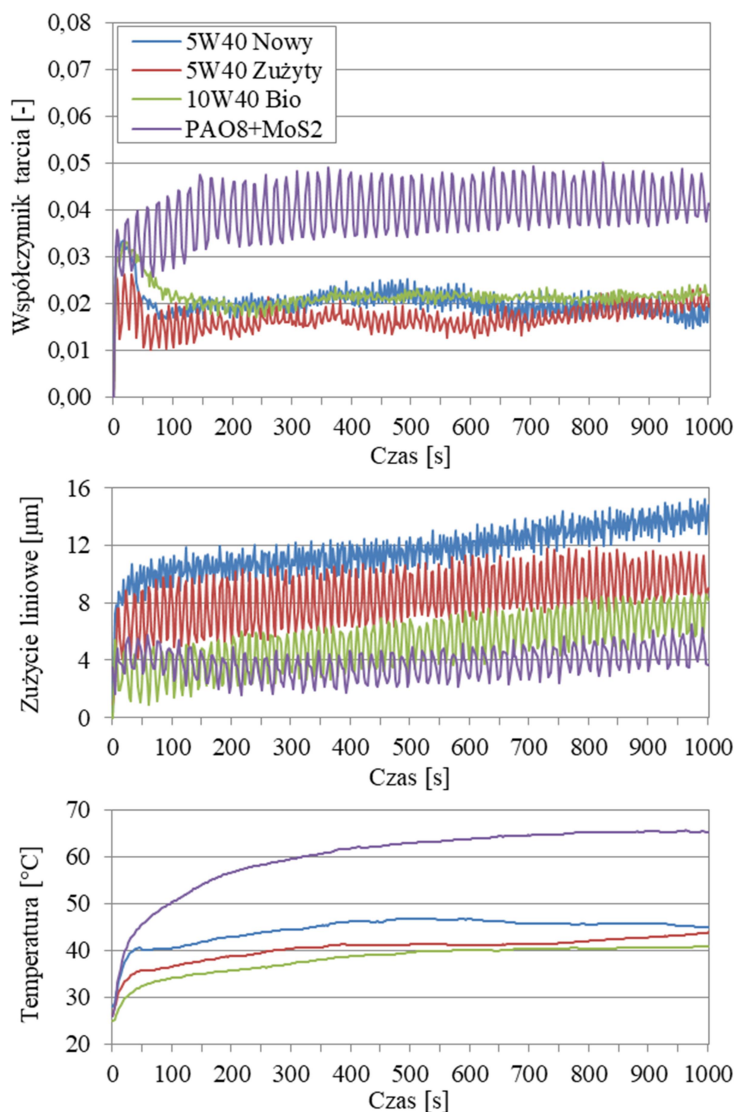
Porównując wykresy siły tarcia (rys 5.6) oraz temperatury w obszarze tarcia pary cierniej (rys 5.7) nie można jednoznacznie określić korelacji pomiędzy wartościami tych parametrów.

### **Zużycie pary cierniej w skojarzeniu konforemnym**

Podczas prób zużycia par ciernych w skojarzeniu konforemnym zarejestrowane zostały przebiegi współczynnika tarcia, temperatury oraz sumarycznego zużycia liniowego elementów pary cierniej w funkcji czasu trwania próby. Ponieważ pomiary nie wykazały mierzalnego zużycia próbek pierścieniowych przyjęto, że wartość zużycia liniowego można odnieść do zużycia przeciwpórek ze stopu łożyskowego.

Zmiany współczynnika tarcia zmierzone w parach ciernych z próbkami ulepszanymi cieplnie smarowanych olejem nowym 5W40 i olejem biodegradowalnym 10W40 przy naciskach jednostkowych 20 MPa wykazują duże podobieństwo (rys. 5.8). W przypadku tych olejów na początku próby obserwowany jest intensywny wzrost współczynnika tarcia, po czym następuje powolny jego spadek i stabilizacja do końca trwania próby. Pary cierne smarowane olejem bazowym PAO8 z dodatkiem

dwusiarczku molibdenu mają tendencję do wzrostu współczynnika tarcia w fazie początkowej trwania próby i stabilizacji wartości współczynnika tarcia na najwyższym poziomie spośród badanych par z próbkami ulepszanymi cieplnie, przy istotnych wahaniami wartości współczynnika tarcia.



Rysunek 5.8. Współczynnik tarcia, zużycie liniowe i temperatura w obszarze tarcia w parach ciernych z próbkami ulepszanymi cieplnie, nacisk jednostkowy 20 MPa

Wartość współczynnika tarcia pod koniec prób zużycia (ostatnie 50 punktów pomiarowych) w parach ciernych pracujących w obecności oleju nowego 5W40, oleju zużytego 5W40 i oleju biodegradowalnego 10W40 osiągają zbliżone wartości współczynnika tarcia (0,018-0,022), dwukrotnie wyższa wartość występuje w parze ciernej smarowanej olejem PAO8 z dodatkiem MoS<sub>2</sub> - 0,042.

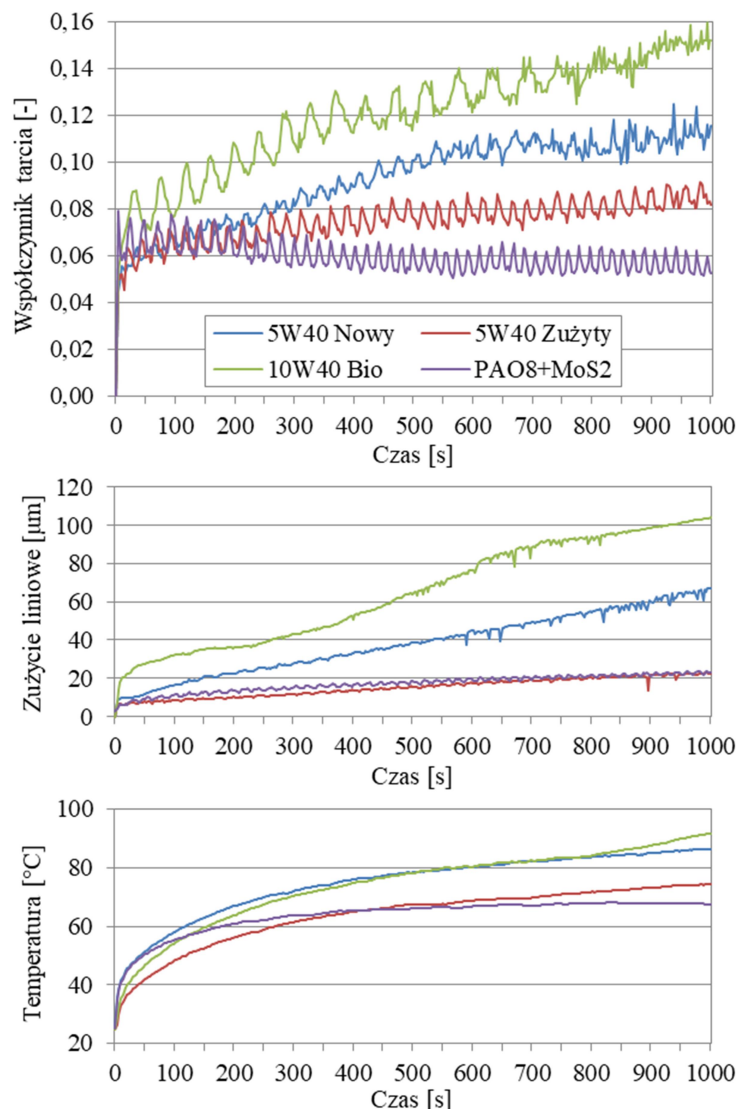
Przebiegi zużycia liniowego zarejestrowane dla badanych par ciernych nie wykazują znaczących różnic (rys. 5.8). Badane przeciwpróbki ze stopu łożyskowego współpracujące z pierścieniami ulepszanymi cieplnie zużywają się w niewielkim stopniu niezależnie od zastosowanego środka smarowego, a intensywność zużycia jest w przybliżeniu stała w trakcie trwania prób.

Przebiegi temperatury w obszarze tarcia par ciernych z pierścieniami ulepszanymi cieplnie smarowanych olejem nowym 5W40 i olejem biodegradowalnym 10W40 mają zbliżony do siebie charakter, a różnica pod koniec próby zużycia wyniosła 4,1°C (rys. 5.8). Para cierna smarowana olejem użytym 5W40 wykazuje niższe temperatury w obszarze tarcia w porównaniu do pary smarowanej olejem nowym 5W40, jednak pod koniec próby zaczyna nieznacznie rosnąć. Jest to zbieżne z zarejestrowanymi wartościami współczynnika tarcia (wzrost wartości pod koniec próby zużycia). Zarejestrowane pod koniec prób wartości temperatur nie przekraczają 45°C. Para cierna z próbką ulepszaną cieplnie smarowana olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu osiąga najwyższe temperatury pod koniec próby spośród badanych par ciernych z pierścieniami ulepszanymi cieplnie (powyżej 65°C), a temperatura jest istotnie wyższa przez cały czas trwania próby zużycia w porównaniu do pozostałych olejów.

Współczynnik tarcia w parach ciernych z próbkami z powłoką a-C:H:W uzyskuje wyższe wartości w porównaniu z parami z próbkami ulepszanymi cieplnie (rys. 5.9). Parę cierną z próbką z powłoką a-C:H:W smarowaną olejem nowym 5W40 charakteryzuje stopniowy wzrost wartości współczynnika tarcia wraz z czasem trwania próby, a po przekroczeniu połowy czasu biegu badawczego (ok. 550 s) następuje zmniejszenie intensywności przyrastania wartości współczynnika tarcia (faza stabilizacji oporów tarcia). Para cierna smarowana olejem użytym 5W40 wykazuje wolniejszy przyrost zmian współczynnika tarcia w porównaniu smarowania olejem nowym 5W40 i trend ten jest zachowany przez cały czas trwania próby (brak fazy stabilizacji oporów tarcia).

Najintensywniejsze zmiany oporu tarcia występują w parze cierniej smarowanej olejem biodegradowalnym 10W40, ponieważ można zaobserwować ciągły wzrost wartości współczynnika tarcia połączony z wysokimi amplitudami, aż do osiągnięcia maksymalnej wartości równej 0,15. Najbardziej stabilne warunki tarcia zapewnia smarowanie pary cierniej olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu,

który prowadzi do stabilizacji współczynnika tarcia, a nawet nieznacznego spadku oporów tarcia w trakcie trwania próby po początkowej fazie współpracy.



Rysunek 5.9. Współczynnik tarcia, zużycie liniowe i temperatura w obszarze tarcia w parach ciernych z próbkami z powłoką a-C:H:W, nacisk jednostkowy 20 MPa

W parach ciernych z próbkami pierścieniowymi z powłoką a-C:H:W wartości współczynnika tarcia pod koniec próby charakteryzują się znaczną rozbieżnością w stosunku do par z próbkami ulepszanymi cieplnie. Najwyższą wartość osiągnęła para cierna smarowana olejem biodegradowalnym 10W40 – 0,15. Współczynnik tarcia pary smarowanej olejem nowym 5W40 wyniósł 0,11, a olej zużytym 5W40 - 0,08. Są to wartości kilkukrotnie wyższe w porównaniu do odpowiadających im wartości zarejestrowanych w parach z próbkami ulepszanymi cieplnie. Najniższą wartość pod koniec prób zużycia osiągnęło skojarzenie cierne smarowane olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub> –

0,056 i jest to wartość o 33% wyższa niż w parach ciernych z próbkami bez powłoki węglowej. W porównaniu do badań przeprowadzonych na próbkach pierścieniowych ulepszanych cieplnie przebiegi współczynnika dla oleju bazowego PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu mają zbliżony do siebie charakter. Wyższe wartości w przypadku par z próbkami z powłoką a-C:H:W wskazują na pogorszenie warunków tarcia, jednakże biorąc pod uwagę pozostałe badane oleje różnice te są niewielkie. W przypadku par ciernych z próbkami z powłoką a-C:H:W maksymalna wartość współczynnika tarcia przypada nie na fazę rozruchu, jak było w przypadku próbek ulepszanych cieplnie, a na koniec próby. Wyjątkiem dla obu badanych rodzajów obróbki powierzchniowej próbek pierścieniowych jest kompozycja z olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu, w której maksymalny współczynnik tarcia przypadający poza fazę rozruchu zaobserwowano dla par z próbkami pierścieniowymi ulepszanymi cieplnie, natomiast istotna zmiana wartości współczynnika tarcia w trakcie rozruchu i stabilizacja wartości w czasie trwania próby została zarejestrowana podczas badań pary cieiernej z próbką z powłoką węglową.

Na wykresie liniowego zużycia przeciwpróbek pracujących z pierścieniami z powłoką węglową można wyróżnić dwie grupy charakterystyk (rys. 5.9). Pierwszą z nich stanowią przebiegi uzyskane dla par ciernych pracujących w obecności oleju nowego 5W40 i oleju biodegradowalnego 10W40, które charakteryzuje wysoka wartość zużycia liniowego przeciwpróbek ze stopu łożyskowego. W drugiej grupie znalazły się przebiegi zarejestrowane podczas pracy par ciernych z olejem użytym 5W40 oraz olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu wykazujące mniejszą intensywność zużycia. Największe zużycie zarejestrowano w parze smarowanej olejem biodegradowalnym 10W40 – 56,89  $\mu\text{m}$  i w przypadku tego oleju przebieg nie ma charakteru liniowego – przeciwpróbka ze stopu łożyskowego zużywała się z różną intensywnością wraz z czasem trwania próby. Niższe w porównaniu do smarowania olejem biodegradowalnym 10W40 zużycie liniowe zarejestrowano w parze smarowanej olejem nowym 5W40 – 34,24  $\mu\text{m}$ . W tym przypadku zużycie ma charakter liniowy do ok. 600 s trwania próby, a następnie rejestrowane są wahania wartości mogące świadczyć o intensyfikacji procesów zużycia. Smarowanie pary cieiernej olejem użytym 5W40 powoduje niskie zużycie liniowe przeciwpróbki (9,89  $\mu\text{m}$ ), zarejestrowany przebieg ma charakter liniowy, a proces zużycia przebiega stabilnie. Zużycie liniowe w parze cieiernej smarowanej olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu charakteryzuje liniowy charakter przebiegu i stosunkowo niewielkie

wahania rejestrowanych wartości. Zarejestrowane zużycie przeciwpróbki ze stopu CuPb30 w parze ciernej smarowanej olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub> to 7,22 μm.

Porównując zmiany temperatury w obszarze tarcia można stwierdzić, że zastosowanie powłoki węglowej na warstwę powierzchniową próbek pierścieniowych spowodowało przesunięcie wykresów temperatur ku wyższym wartościom oraz zmianę charakteru wykresów w porównaniu do tych uzyskanych dla par ciernych z próbkami ulepszanymi cieplnie. W parach ciernych z próbkami ulepszanymi cieplnie temperatura wzrasta wolniej i na wykresie widoczna jest tendencja do stabilizacji po upływie około 45 s trwania próby. Trendy zmian temperatury w parach z próbkami z powłoką smarowanych olejem nowym i zużytym 5W40 są podobne do siebie i zbliżone również do zmian w parach z próbkami bez powłoki. Para smarowana olejem zużytym 5W40 osiąga niższe wartości w porównaniu do pary smarowanej olejem nowym 5W40, a różnica pod koniec próby zużycia wyniosła 11,9°C. W parach smarowanych olejami nowym i zużytym 5W40 oraz olejem biodegradowalnym 10W40 nie występuje stabilizacja temperatury w obszarze tarcia, a zmniejsza się tylko intensywność wzrostu temperatury. Temperatura w obszarze tarcia par ciernych smarowanych olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu, zarówno w parach z pierścieniami bez powłoki jak i z powłoką a-C:H:W zachowuje niemal identyczny trend zmian i stabilizuje się w połowie biegu badawczego. W warunkach smarowania olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub> w parze z próbką bez powłoki temperatura zarejestrowana w obszarze tarcia była wyższa niż w pozostałych skojarzeniach smarowanych badanymi olejami. Natomiast w parze z próbką z powłoką a-C:H:W wartość temperatury jest najniższa spośród zarejestrowanych, a olej PAO8 + MoS<sub>2</sub> jako jedyny z badanych olejów wykazuje tendencję do tworzenia warunków tarcia sprzyjających stabilizacji temperatury w czasie trwania próby.

W trakcie prób zużycia par ciernych w skojarzeniu konforemnym zarejestrowane zostały przebiegi siły tarcia, temperatury oraz zużycia liniowego w funkcji czasu trwania próby (tabela 5.3).

Zastosowanie w parach ciernych próbek pierścieniowych z powłoką a-H:C:W powoduje wzrost oporów ruchu w większości badanych skojarzeń w porównaniu do par z próbkami bez powłoki (rys. 5.10). W przypadku zastosowania w skojarzeniu trącym próbek ulepszanych cieplnie i smarowania olejem nowym 5W40 obserwuje się łagodny przyrost momentu tarcia wraz ze wzrostem nacisków jednostkowych. Moment tarcia kształtuje się na poziomie ok. 1 Nm dla nacisków 20 MPa (rys. 5.10a).

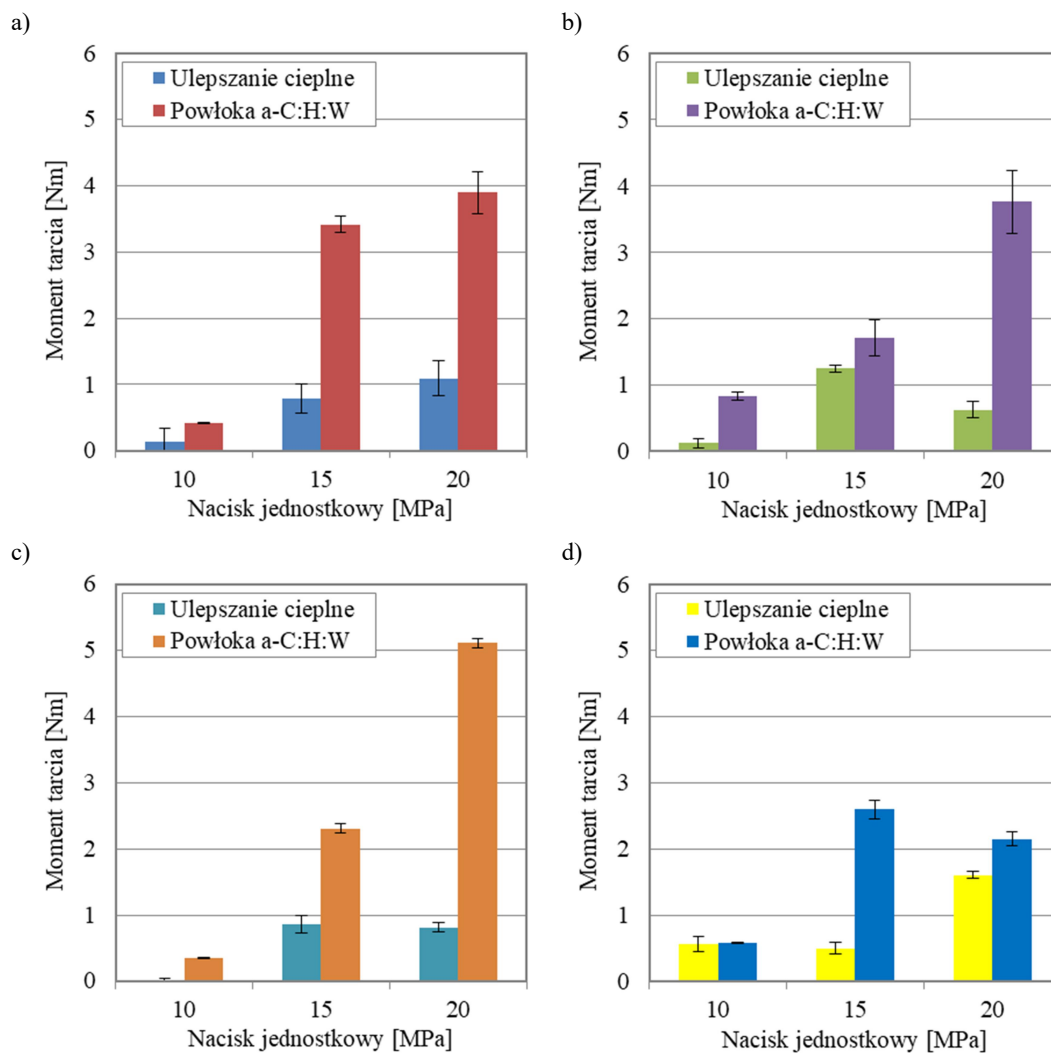
Tabela 5.3. Siła tarcia, zużycie liniowe przeciwpróbek, ubytki masowe i temperatura w obszarze tarcia w trakcie prób zużycia wężła ciemnego rolka-klocek w styku rozłożonym (n=100 obr/min, t=1000 s)

Kompozycja pary ciernej								
Nacisk jednostkowy [MPa]	Próbka pierścieniowa ulepszana cieplnie – przeciwpróbka CuPb30				Próbka pierścieniowa z powłoką a-C:H:W – przeciwpróbka CuPb30			
	Rodzaj oleju							
	5W40 Nowy	5W40 Zużyty	10W40 Bio	PAO8 + MoS <sub>2</sub>	5W40 Nowy	5W40 Zużyty	10W40 Bio	PAO8 + MoS <sub>2</sub>
Siła tarcia [N]								
10	7,5	6,5	1,0	32,0	23,6	46,9	19,8	32,9
15	44,8	70,8	48,7	28,4	195,0	97,3	131,8	148,6
20	62,2	35,5	46,6	91,6	222,6	214,5	292,1	122,9
Zużycie liniowe stopu łożyskowego CuPb30 [μm]								
10	3,61	1,31	0,97	2,40	7,44	14,27	8,52	15,97
15	2,87	0,75	1,88	0,49	12,92	9,31	39,82	15,09
20	2,89	3,17	1,30	1,02	36,30	11,62	25,72	7,34
Ubytek masowy stopu łożyskowego CuPb30 [mg]								
10	10,38	10,20	1,28	4,00	33,13	63,03	34,23	47,90
15	9,28	5,33	7,33	1,40	68,23	35,78	128,05	64,47
20	11,20	10,98	5,30	5,80	122,63	55,65	121,65	31,97
Temperatura [°C]								
10	35,6	33,0	27,8	44,1	44,6	49,7	34,6	41,7
15	43,9	47,7	41,4	38,2	79,5	51,1	70,0	67,1
20	54,4	47,6	43,9	64,1	85,9	80,9	87,2	67,2

Pary z próbkami z powłoką a-C:H:W przy naciskach jednostkowych 10 MPa generują nieznacznie wyższe opory tarcia w porównaniu do par z próbkami ulepszanymi cieplnie, jednak przy zwiększeniu nacisków do 15 i 20 MPa moment tarcia jest niemal czterokrotnie wyższy. W trakcie badań par ciernych smarowanych olejem użytym 5W40 maksymalną wartość momentu tarcia spośród par z próbkami pierścieniowymi ulepszanymi cieplnie wyznaczono podczas pracy z naciskami 15 MPa i wynosiła ona 1,24 Nm (rys. 5.10b). W tych warunkach obciążenia różnica pomiędzy parami z próbkami ulepszanymi cieplnie i parami z próbkami z powłoką a-C:H:W jest najmniejsza. Przy naciskach jednostkowych o wartości 20 MPa pary z próbkami z powłoką generują sześciokrotnie wyższe opory tarcia w porównaniu do par z próbkami bez powłoki. W parach ciernych z próbkami ulepszanymi cieplnie smarowanych olejem biodegradowalnym 10W40 przy obciążeniu obszaru tarcia naciskami jednostkowymi 10 MPa wartość momentu tarcia wynosi 0,02 Nm,



i wraz z ich zwiększeniem do wartości 15 i 20 MPa występuje wzrost momentu tarcia do wartości 0,82-0,85 Nm (rys. 5.10c).

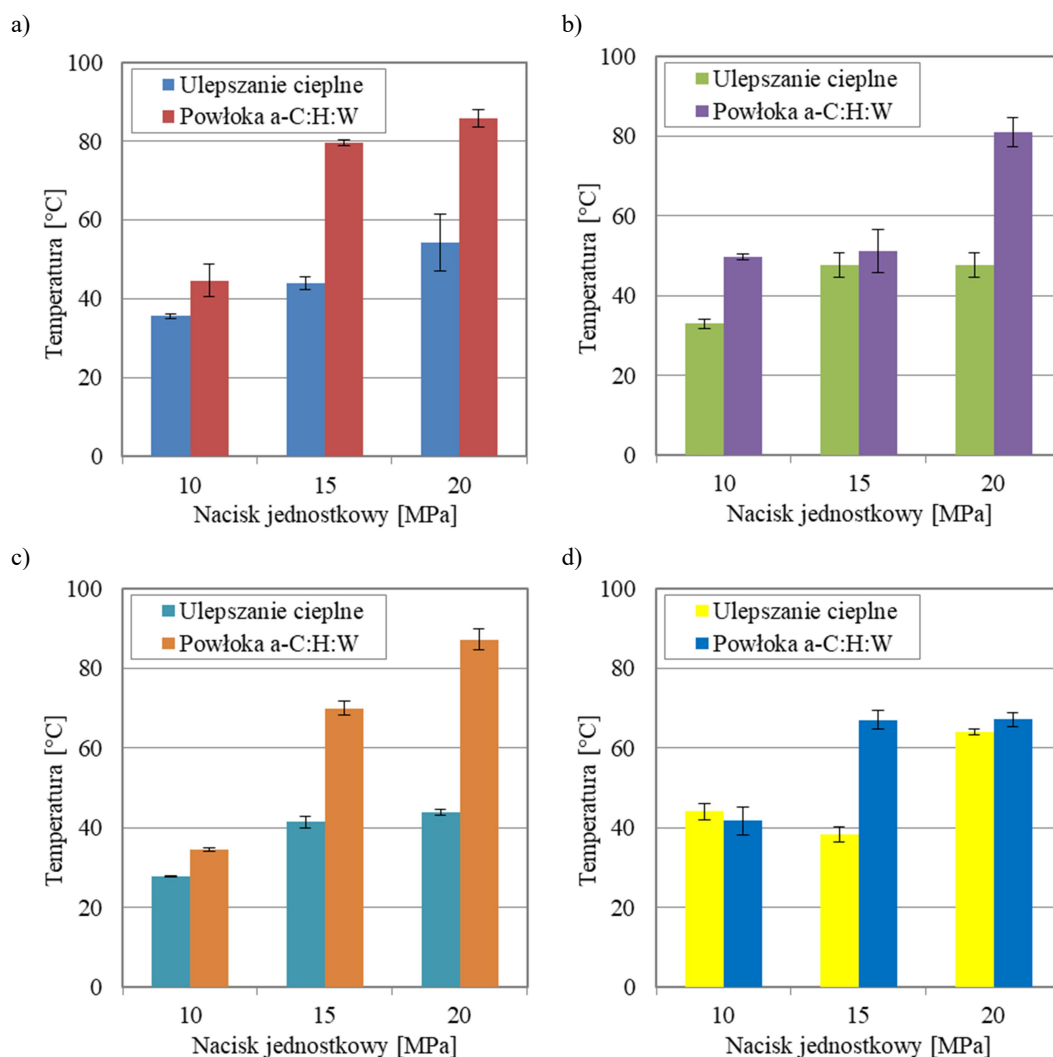


Rysunek 5.10. Moment tarcia w parach ciernych w funkcji nacisku jednostkowego i kompozycji pary ciernej przy smarowaniu olejami: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS<sub>2</sub>, (n=100 obr/min, t=1000 s)

Zastosowanie powłoki węglowej na powierzchni próbek pierścieniowych przy smarowaniu olejem biodegradowalnym 10W40 wprowadza wyraźny, liniowy wzrost oporów tarcia wraz ze wzrostem nacisków jednostkowych. Po obciążeniu pary ciernej naciskami jednostkowymi o wartości 20 MPa zarejestrowano najwyższy spośród wszystkich badanych par ciernych moment tarcia – 5,11 Nm. W parach ciernych smarowanych olejem bazowym PAO8 z dodatkiem MoS<sub>2</sub> i naciskach 10 MPa wartości momentu tarcia są zbliżone dla obu badanych typów próbek pierścieniowych - 0,56 Nm (ulepszana cieplnie) i 0,58 Nm (powłoka a-C:H:W). Przy naciskach jednostkowych 15 MPa różnica pomiędzy wartościami zmierzonymi dla obu badanych rodzajów

próbek zwiększyła się do 2,1 Nm. Przy nacisku 20 MPa różnica pomiędzy uzyskiwanymi wartościami zmniejszyła się i w skojarzeniu z próbką bez powłoki moment tarcia wyniósł 1,6 Nm, zaś z próbką z powłoką 2,15 Nm (rys. 5.10d).

Widoczna jest wyraźna tendencja pokazująca, że powłoki węglowe w skojarzeniu ze stopem łożyskowym w styku rozłożonym powodują wzrost oporów tarcia i brak stabilizacji procesów tarcia.



Rysunek 5.11. Temperatura w obszarze tarcia w funkcji nacisku jednostkowego i kompozycji pary cieiernej przy smarowaniu olejami: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS<sub>2</sub>, (n=100 obr/min, t=1000 s)

W większości skojarzeń badanych par ciernych zastosowanie próbki pierścieniowej z powłoką a-C:H:W powodowało, że temperatury w obszarze tarcia były wyższe niż w parach ciernych z próbkami pierścieniowymi ulepszanymi cieplnie (rys. 5.11). Pary cierne z próbkami z powłoką smarowane olejem nowym 5W40 osiągają wyższe temperatury niż skojarzenia z próbkami ulepszanymi cieplnie bez powłoki. Przy

naciskach 10 MPa temperatura wzrosła o 25%, przy 15 MPa o 81%, a przy 20 MPa o 58% (rys. 5.11a).

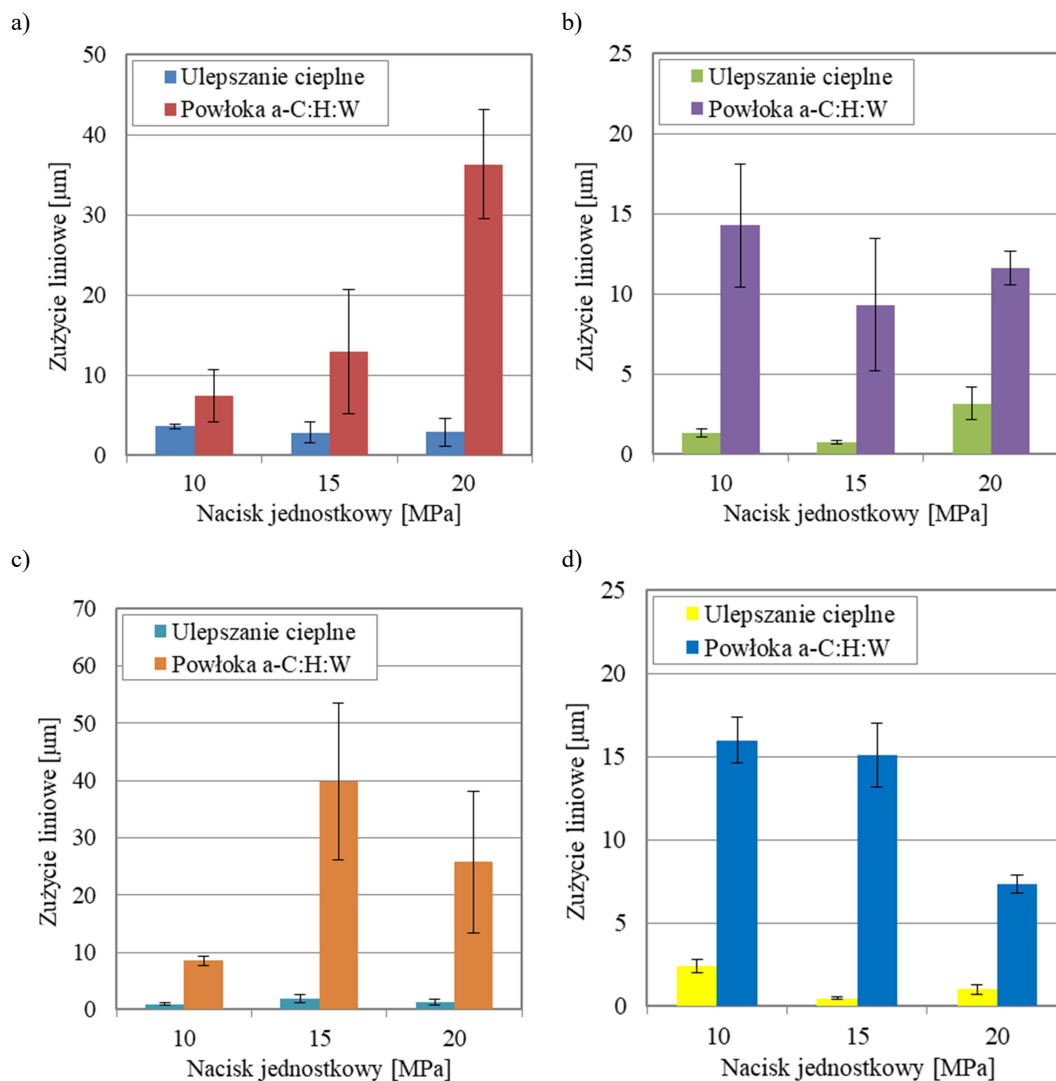
Temperatury uzyskane w parach z próbkami pierścieniowymi z powłoką w zakresie średnich i maksymalnych nacisków jednostkowych oscylują w granicach 79,5-85,9°C, podczas, gdy odpowiednie temperatury uzyskane w parach z próbkami ulepszanymi cieplnie wynoszą 43,9-54,4°C. Podczas pracy z naciskami jednostkowymi 10 MPa temperatura w skojarzeniu ciernym z próbką z powłoką osiąga temperaturę 44,6°C, co odpowiada poziomowi temperatur w skojarzeniu ciernym z próbką bez powłoki przy nacisku 15 MPa (rys. 5.11a). W przypadku oleju zużytego 5W40 i użycia próbek ulepszanych cieplnie temperatury przy naciskach jednostkowych 15 i 20 MPa kształtują się na jednakowym poziomie – 47,7°C i 47,6°C (rys. 5.11b). Zastosowanie próbek z powłoką węglową w warunkach smarowania olejem użytym 5W40 powoduje wzrost temperatur w obszarze styku elementów pary względem par ciernych z próbkami ulepszanymi cieplnie rzędu 51% (nacisk jednostkowy 10 MPa), 7% (nacisk jednostkowy 15 MPa) i 70% (nacisk jednostkowy 20 MPa). Spośród badanych par ciernych z próbkami ulepszanymi cieplnie w większości przypadków najniższe wartości temperatur w obszarze tarcia osiągają pary smarowane olejem biodegradowalnym 10W40 (rys. 5.11c). Wartości temperatury w zakresie nacisków 15-20 MPa są na zbliżonym poziomie (41,4 i 43,9°C). Powłoka węglowa ukształtowana na próbkach pierścieniowych w parach smarowanych olejem biodegradowalnym 10W40 powoduje wzrost temperatury w obszarze tarcia o 24% przy naciskach 10 MPa, o 69% w zakresie nacisków jednostkowych 15 MPa i o 99% przy naciskach jednostkowych 20 MPa względem par z próbkami bez powłoki. Olej bazowy PAO8 z dodatkiem MoS<sub>2</sub> smarujący skojarzenie cierne z próbkami ulepszanymi cieplnie osiąga minimalną wartość temperatury przy naciskach 15 MPa – 38,2°C, nieco wyższą – 44,1°C przy naciskach 10 MPa oraz 64,1°C przy 20 MPa. Temperatura zarejestrowana dla tego oleju podczas pracy z naciskami 20 MPa jest najwyższą spośród par ciernych z próbkami ulepszanymi cieplnie smarowanych badanymi olejami (rys. 5.11d). Współpraca przeciwpróbek ze stopu łożyskowego z pierścieniami z powłoką a-C:H:W przy naciskach jednostkowych 10 MPa powoduje nieznaczny spadek temperatury (5,3%), znaczny wzrost o 75% po ich zwiększeniu do wartości 15 MPa i wzrost o 4,8% po zwiększeniu nacisków jednostkowych do 20 MPa względem par ciernych z próbkami bez powłoki. Przy średnich i wysokich wartościach nacisków jednostkowych węzła

tarcia temperatura w obszarze tarcia próbek z powłoką węglową osiąga zbliżone wartości (67,1-67,2°C).

Spośród wszystkich badanych par ciernych najwyższa temperatura zarejestrowana została dla oleju biodegradowalnego 10W40 przy naciskach jednostkowych 20 MPa i zastosowaniu próbek pierścieniowych z powłoką a-C:H:W – 87,2°C (rys. 5.11c). Najniższa temperatura w analogicznych warunkach wystąpiła w parach ciernych smarowanej kompozycją olej bazowy PAO8 z dodatkiem MoS<sub>2</sub> - 67,2°C (rys. 5.11d).

Ze względu na brak mierzalnego zużycia próbek pierścieniowych ulepszanych cieplnie i próbek pierścieniowych z powłoką a-C:H:W (zarejestrowano tylko zmiany w strukturze geometrycznej warstwy powierzchniowej) można przyjąć, że zmierzone wielkości zużycia liniowego dotyczą głównie zużycia materiału stopu łożyskowego CuPb30 (rys. 5.12).

Wartość zużycia liniowego przeciwpróbek ze stopu łożyskowego podczas pracy z próbkami ulepszanymi cieplnie i olejem nowym 5W40 w zakresie badanych nacisków nie przekracza 4 µm (rys. 5.12a). Maksymalne zarejestrowane zużycie przypadło na próby przy naciskach jednostkowych 10 MPa i wyniosło 3,61 µm. Wraz ze wzrostem wartości nacisków rejestrowane zużycie liniowe przeciwpróbki wynosi 2,87 i 2,89 µm w zakresie nacisków 15 i 20 MPa. Pary cierne z próbkami z powłoką a-C:H:W wykazują ponad dwukrotne zwiększenie zużycia po próbach z naciskami jednostkowymi 10 MPa (7,44 µm). Przy naciskach 15 MPa zużycie liniowe przeciwpróbki ze stopu łożyskowego wynosi 12,92 µm, a w warunkach najwyższych badanych nacisków jednostkowych wężła tarcia zużycie liniowe wyniosło 36,3 µm. Jest to niemal trzynastokrotny wzrost wartości w porównaniu do zużycia przeciwpróbek pracujących z próbkami bez powłoki. Zarejestrowane zużycie liniowe par ciernych z próbkami ulepszanymi cieplnie smarowanymi olejem użytym 5W40 nie przekracza 3,17 µm podczas pracy z naciskami jednostkowymi 20 MPa (rys. 5.12b). Zastosowanie próbek pierścieniowych z powłoką a-C:H:W powoduje wzrost zużycia liniowego przeciwpróbek ze stopu CuPb30 do wartości od 9,31 µm przy 15 MPa do 14,27 µm przy naciskach 10 MPa. Eksploatacja par ciernych z próbkami z powłoką węglową ma istotny wpływ na zwiększenie zużycia liniowego przeciwpróbek ze stopu łożyskowego smarowanych olejem biodegradowalnym 10W40 (rys. 5.12c). Podczas pracy z naciskami 15 MPa zarejestrowano najwyższą wartość zużycia liniowego spośród wszystkich badanych przeciwpróbek – 39,82 µm.

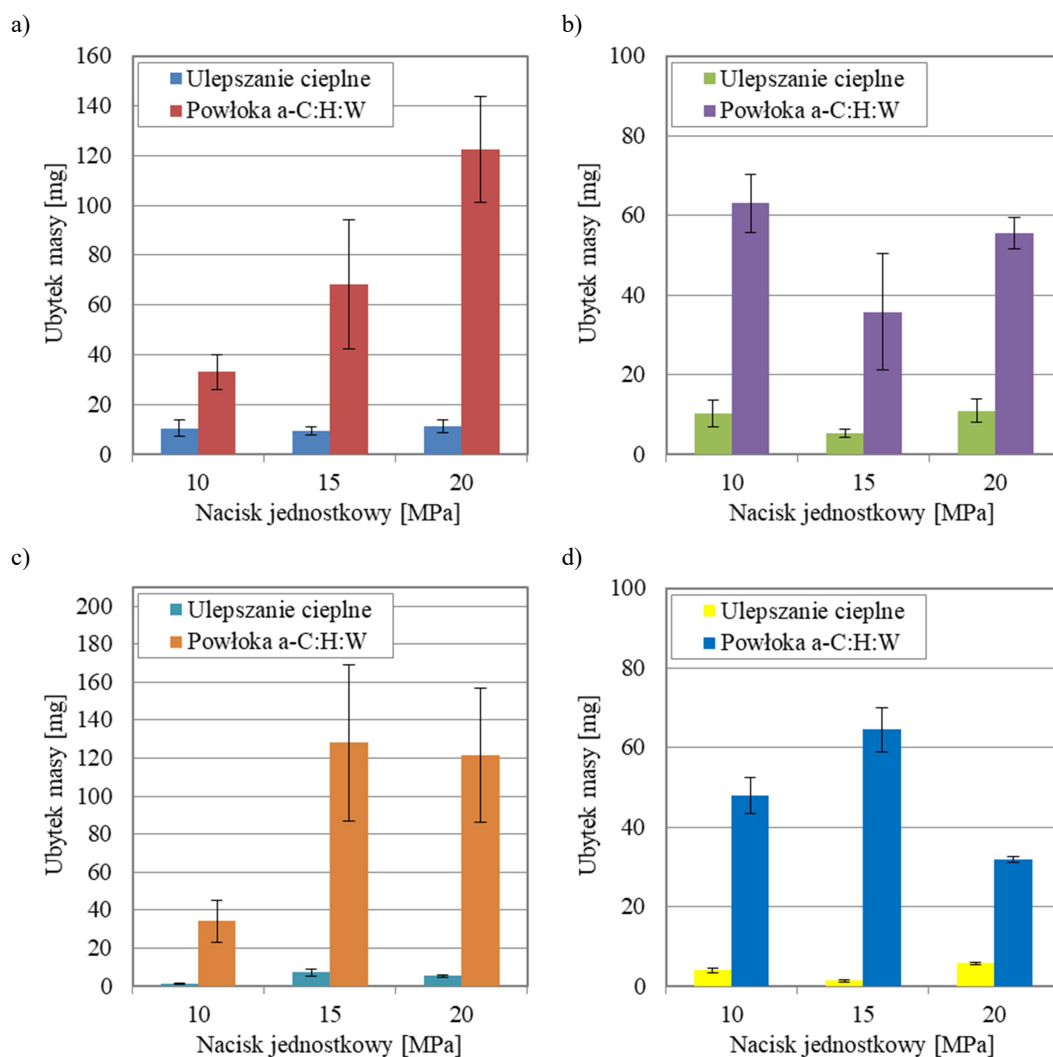


Rysunek 5.12. Zużycie liniowe elementów par ciernych w funkcji nacisku jednostkowego i kompozycji pary cierniej przy smarowaniu olejami: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS<sub>2</sub>, (n=100 obr/min, t=1000 s)

O ile przy próbkach ulepszanych cieplnie smarowanych olejem biodegradowalnym 10W40 zużycie liniowe przeciwpróbek nie przekracza wartości 1,88 µm, o tyle wprowadzenie w obszar tarcia próbek z powłoką powoduje niemal dziewięciokrotny wzrost zużycia stopu łożyskowego przy naciskach 10 MPa, 21-krotny wzrost przy 15 MPa i 20-krotny wzrost przy naciskach jednostkowych 20 MPa w porównaniu do skojarzenia ciernego z próbkami bez powłoki węglowej. Pary cierne pracujące w obecności oleju bazowego PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu z próbkami ulepszanymi cieplnie charakteryzuje niewielkie zużycie liniowe przeciwpróbek ze stopu łożyskowego (rys. 5.12d). Najwyższą wartość zużycia liniowego przeciwpróbek w parach z próbkami ulepszanymi cieplnie smarowanych

olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub> zarejestrowano podczas pracy z naciskami jednostkowymi 10 MPa i wyniosła ona 2,4 μm. Zużycie liniowe przeciwpórek ze stopu łożyskowego po zastosowaniu w kompozycji czarnej próbek z powłoką węglową osiągnęło 15,97 μm przy naciskach 10 MPa, 15,09 μm przy 15 MPa i 7,34 μm przy naciskach jednostkowych 20 MPa.

Pomiary masy przeciwpórek ze stopu łożyskowego przed i po próbach zużycia w styku rozłożonym pozwoliły na oszacowanie ubytków masowych przeciwpórkki Δm (rys. 5.13).



Rysunek 5.13. Zużycie masowe Δm przeciwpórek ze stopu CuPb30 przy smarowaniu olejami: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS<sub>2</sub>, (n=100 obr/min, t=1000 s)

Zużycie masowe stopu łożyskowego współpracującego z pierścieniami ulepszanymi cieplnie i olejem nowym 5W40 kształtuje się na zbliżonym do siebie poziomie w całym zakresie badanych nacisków jednostkowych (rys. 5.13a). Wartości

zużycia zawierają się w przedziale od 9,28 mg do 11,20 mg. Zastosowanie pierścieni z powłoką a-C:H:W w skojarzeniu ciernym spowodowało istotny wzrost zużycia masowego stopu łożyskowego wraz ze wzrostem nacisków jednostkowych w obszarze styku. Przy nacisku 10 MPa obserwuje się ponad trzykrotny wzrost zużycia względem par z próbkami ulepszanymi cieplnie. Zwiększenie wartości nacisków do 15 MPa poskutkowało siedmiokrotnym wzrostem zużycia masowego próbki, a obciążenie węzła naciskami jednostkowymi 20 MPa zwiększyło zużycie próbek jedenastokrotnie. Podobnie jak w przypadku oleju nowego, pary cierne pracujące z olejem użytym 5W40 i próbkami ulepszanymi cieplnie zużywają się nieznacznie i w podobnym przedziale wartości 5,33-10,98 mg (rys. 5.13b). Zmiana próbek pierścieniowych na pokryte powłoką węglową powoduje wzrost zużycia masowego. W przypadku nacisków jednostkowych 15 MPa jest to niemal siedmiokrotny wzrost względem próbek ulepszanych cieplnie (35,78 mg). Podobne zmiany występują w parach smarowanych olejem biodegradowalnym 10W40, w których przy nacisku 10 MPa zużycie masowe stopu łożyskowego wzrosło z 1,28 mg do 34,23 mg, przy 15 MPa z 7,33 mg do 128,05 mg, a przy 20 MPa z 5,3 mg do 121,65 mg w parach z pierścieniami z powłoką w stosunku do par z pierścieniami ulepszanymi cieplnie (rys. 5.13c). Wartości w zakresie nacisków 15 i 20 MPa są najwyższe spośród wszystkich badanych skojarzeń par ciernych. Również w przypadku smarowania kompozycją oleju bazowego PAO8 z dodatkiem MoS<sub>2</sub> zużycie masowe przy współpracy z próbkami ulepszanymi cieplnie nie przekracza 5,8 mg (rys. 5.13d). Zastosowanie powłoki a-C:H:W na próbkach pierścieniowych powoduje natomiast wzrost wartości do 47,9 mg (10 MPa), 64,47 mg (15 MPa) i 31,97 mg (20 MPa).

Zauważalna jest tendencja do intensywnego zużycia powodującego ubytek stopu CuPb30 w parach smarowanych nowymi olejami handlowymi (nowy 5W40, biodegradowalny 10W40) współpracującymi z próbkami z powłoką a-C:H:W. Zużycie masowe przeciwpróbek ze stopu CuPb30 w zakresie nacisków jednostkowych 15 i 20 MPa pracujących z olejem użytym 5W40 jest o połowę niższe w porównaniu do oleju nowego tej samej klasy. Przy maksymalnym nacisku jednostkowym w obszarze styku (20 MPa) pary cierniej z pierścieniami z powłoką a-C:H:W, najmniejsze ubytki masy przeciwpróbek zarejestrowano podczas smarowania olejem bazowym PAO8 z dodatkiem MoS<sub>2</sub>.

### 5.1.2. Zmiany chropowatości warstwy powierzchniowej elementów pary ciernej

Po próbach zużycia par ciernych w styku rozłożonym zmierzona została chropowatość próbek pierścieniowych i przeciwpróbek wykonanych ze stopu łożyskowego CuPb30 (tabela 5.4). Ocenie podlegały parametry chropowatości: Ra, Rz, Rq i RSm. Zmierzone wartości zestawiono z wartościami uzyskanymi dla nieeksploatowanych elementów par ciernych tj. nowej przeciwpróbki ze stopu łożyskowego CuPb30, nowego pierścienia ulepszanego cieplnie i nowego pierścienia z powłoką a-C:H:W.

Tabela 5.4. Parametry chropowatości elementów par ciernych rolka-klocek po próbach zużycia w styku rozłożonym – nacisk jednostkowy 10 MPa

Kompozycja pary ciernej		Próbka pierścieniowa ulepszana cieplnie – przeciwpróbka CuPb30				Próbka pierścieniowa z powłoką a-C:H:W – przeciwpróbka CuPb30			
Element pary ciernej		Przeciwpróbka		Pierścień		Przeciwpróbka		Pierścień	
Olej	Parametr chropowatości	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]
5W40 Nowy	Ra	0,20	-52,8	0,22	6,9	0,53	24,6	0,16	-35,4
	Rz	1,78	-60,5	2,16	26,3	5,14	14,0	1,52	-35,0
	Rq	0,27	-58,2	0,30	14,8	0,79	23,2	0,22	-34,8
	RSm	492	645,5	35,90	8,9	105	59,1	34,40	-2,6
5W40 Zużyty	Ra	0,09	-79,6	0,15	-28,4	0,78	82,9	0,20	-18,9
	Rz	0,68	-84,8	1,22	-28,7	5,48	21,5	2,03	-13,5
	Rq	0,11	-82,8	0,19	-28,4	1,02	59,9	0,28	-17,1
	RSm	54	-18,2	31,60	-4,2	74,60	13,0	29	-17,9
10W40 Bio	Ra	0,21	-51,4	0,17	-15,7	0,18	-56,3	0,28	14,0
	Rz	1,96	-56,5	1,55	-9,4	2,36	-47,7	2,06	-12,2
	Rq	0,29	-54,2	0,23	-13,6	0,27	-57,5	0,35	5,1
	RSm	34,40	-47,9	30,70	-6,9	34,30	-48,0	28,40	-19,6
PAO8 + MoS <sub>2</sub>	Ra	0,47	10,1	0,22	5,9	0,67	57,3	0,22	-10,3
	Rz	3,42	-24,2	1,95	14,0	4,83	7,1	2,28	-2,8
	Rq	0,62	-2,8	0,29	8,0	0,90	40,4	0,30	-9,6
	RSm	64,90	-1,7	34,20	3,7	76	15,2	34	-3,8

Wszystkie badane parametry chropowatości próbki pierścieniowej ulepszanej cieplnie pracującej w parze ciernej smarowanej olejem nowym 5W40 z naciskami jednostkowymi 10 MPa uległy zwiększeniu względem próbki przed testami (tabela 5.4). Najmniejsza zmiana dotyczyła parametru Ra – 6,9%, największa, Rz – 26,3%.



Chropowatość RSm zwiększyła się o 8,9%, zaś parametr Rq o 14,8%. Wartości parametrów chropowatości Ra, Rq i Rz przeciwpróbki ze stopu łożyskowego współpracującej z pierścieniem ulepszanym cieplnie uległy zmniejszeniu: Ra o 52,8%, Rq o 58,2% oraz Rz – o 60,5%. Wystąpiło natomiast ponad siedmiokrotne zwiększenie wartości parametru RSm. W parze cierniej z próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W smarowanej olejem nowym 5W40 widoczna jest odwrotna zależność – zmniejszeniu uległy parametry chropowatości próbki pierścieniowej, zwiększeniu uległa zaś chropowatość powierzchni przeciwpróbki ze stopu CuPb30. Parametry Ra, Rz i Rq względem wartości zmierzonych dla nowych pierścieni z powłoką a-C:H:W zmniejszyły się w zakresie od 34,8% do 35,4%. Zmiana parametru RSm jest nieznaczna – spadek o 2,6% względem próbki nieużywanej. Chropowatość Ra i Rq wycinka półpanewki ze stopu łożyskowego po próbach zużycia z pierścieniem z powłoką zwiększyła się odpowiednio o 24,6 i 23,2%, a chropowatość Rz o 14%. Największą zmianę wykazał parametr RSm, który wzrósł o 59,1% względem wartości zmierzonej przed testami.

Parametry chropowatości elementów skojarzenia ciernego z próbką ulepszaną cieplnie smarowanych olejem zużytym 5W40 przy naciskach jednostkowych 10 MPa uległy zmniejszeniu w odniesieniu do próbek przed próbami zużycia (tabela 5.4). Procentowe zmiany chropowatości powierzchni pierścienia ulepszanego cieplnie wyrażone parametrami Ra, Rz i Rq są niemal identyczne i przyjmują wartości z zakresu 28,4-28,7%. Najmniejsza zmiana dotyczy parametru RSm i wynosi 4,2%. Pomiar przeprowadzone na przeciwpróbce ze stopu łożyskowego współpracującej uprzednio z pierścieniem ulepszanym cieplnie wykazały znaczne zmniejszenie parametrów chropowatości powierzchni Ra, Rz i Rq oscylujące w granicach od 79,6% do 84,8% względem próbki nieeksploatowanej. Spadek parametru chropowatości RSm wyniósł 18,2%. Wszystkie mierzone parametry chropowatości powierzchni próbki pierścieniowej pokrytej powłoką a-C:H:W po próbach zużycia w obecności oleju zużytego 5W40 zmniejszyły się względem próbki nowej. Wartości zmieniły się w zakresie od 13,5% (Rz), do 18,9% (Ra). Zmiany procentowe parametrów Ra, Rz i Rq są mniejsze w porównaniu do wartości uzyskanych zarówno dla próbki ulepszanej cieplnie, jak i próbki z powłoką węglową smarowanych olejem nowym 5W40. Chropowatość powierzchni współpracującej z pierścieniem z powłoką przeciwpróbki ze stopu łożyskowego istotnie wzrosła – największy wzrost dotyczy parametrów Ra i Rq –

82,9 i 59,9% względem nowej przeciwpróbki. Parametry Rz i Rq zwiększyły się odpowiednio o 21,5 i 13%.

Chropowatość powierzchni elementów pary ciernej z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie w warunkach smarowania olejem biodegradowalnym 10W40 i naciskach jednostkowych 10 MPa uległa zmniejszeniu w porównaniu do nieużywanych elementów skojarzenia ciernego (tabela 5.4). Parametry Ra i Rq pierścienia ulepszanego cieplnie zmniejszyły się odpowiednio o 15,7 i 13,6%, zaś parametry Rz i RSm o 9,4 i 6,9%. Parametry chropowatości powierzchni przeciwpróbki ze stopu łożyskowego po próbach z pierścieniami ulepszanymi cieplnie zmniejszyły się w zakresie od 47,9% dla parametru RSm do 56,5% dla parametru chropowatości Rz. W przypadku pary ciernej z próbką pierścieniową pokrytą powłoką a-C:H:W smarowanej olejem biodegradowalnym 10W40 nastąpiło zwiększenie parametrów Ra (14%) i Rq (5,1%) oraz redukcja parametrów Rz (12,2%) i RSm (19,6%). Wartości uzyskane dla przeciwpróbki ze stopu CuPb30 współpracującej z pierścieniem z powłoką zmniejszyły się w odniesieniu do nowych próbek w zakresie od 48 do 57,5%. Wartości te są zbliżone do wyników uzyskanych dla przeciwpróbek pracujących z pierścieniami ulepszanymi cieplnie smarowanych olejem biodegradowalnym 10W40.

Chropowatość próbki pierścieniowej ulepszanej cieplnie w warunkach smarowania olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub> przy naciskach jednostkowych 10 MPa zwiększyła się (tabela 5.4). Największy wzrost zarejestrowano dla parametru Rz – 14%, nieco niższy dla chropowatości Rq – 8%, następnie Ra - 5,9% i RSm – 3,7%. Chropowatość Ra wycinka łożyska ślizgowego współpracującego z próbką ulepszaną cieplnie zwiększyła się o 10,1%, natomiast znacznemu zmniejszeniu uległ parametr Rz – 24,2% względem nowej półpanewki. Zmniejszenie wartości chropowatości wyrażonej przez parametry Rq i RSm jest nieznaczne i nie przekracza 3%. Odmienna tendencja wystąpiła w parze ciernej z próbką pierścieniową z powłoką węglową – wartości parametrów Ra i Rq pierścienia zmniejszyły się w granicach 9,6 – 10,3%, a parametrów Rz i Rsm - 2,8 – 3,8%. Jednocześnie zwiększeniu uległa chropowatość powierzchni przeciwpróbki ze stopu CuPb30 współpracującej z pierścieniem z powłoką w obecności oleju bazowego PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu. Zmiana parametru chropowatości Ra osiąga 57,3%, a parametru Rq – 40,4%. Nieco mniejsze zmiany zmierzono w przypadku parametru Rz – 7,1% i RSm, gdzie zmiana sięga 15,2%.

Parametry chropowatości Ra, Rz i Rq pierścienia ulepszanego cieplnie współpracującego z przeciwpróbką ze stopu CuPb30 w warunkach nacisków

Tabela 5.5. Parametry chropowatości elementów par ciernych rolka-klocek po próbach zużycia w styku rozłożonym – nacisk jednostkowy 15 MPa

Kompozycja pary ciernej		Próbka pierścieniowa ulepszana cieplnie – przeciwpróbka CuPb30				Próbka pierścieniowa z powłoką a-C:H:W – przeciwpróbka CuPb30			
Element pary ciernej		Przeciwpróbka		Pierścień		Przeciwpróbka		Pierścień	
Olej	Parametr chropowatości	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]
5W40 Nowy	Ra	0,17	-61,3	0,22	6,4	1,10	158,2	0,21	-12,3
	Rz	1,25	-72,3	1,74	1,8	8,18	81,4	1,59	-32,2
	Rq	0,23	-63,9	0,29	8,0	1,50	135,1	0,27	-18,3
	RSm	77,70	17,7	32,90	-0,2	98,90	49,8	27,70	-21,6
5W40 Zużyty	Ra	0,20	-52,1	0,16	-23,0	0,88	106,8	0,18	-25,1
	Rz	2,13	-52,8	1,54	-9,9	6,11	35,5	1,64	-29,9
	Rq	0,32	-50,3	0,20	-22,7	1,21	89,7	0,25	-26,4
	RSm	61,20	-7,3	28,90	-12,3	143	116,7	29,60	-16,2
10W40 Bio	Ra	0,21	-50,9	0,25	22,1	0,38	-11,3	0,19	-23,5
	Rz	1,88	-58,3	2,43	42,1	3,86	-14,4	1,48	-36,9
	Rq	0,30	-53,6	0,44	67,8	0,56	-12,9	0,24	-27,9
	RSm	68,30	3,5	37,10	12,5	79,50	20,5	27,30	-22,7
PAO8 + MoS <sub>2</sub>	Ra	0,23	-46,7	0,20	-3,4	0,41	-3,5	0,14	-41,2
	Rz	2,80	-37,9	2,49	45,6	3,64	-19,3	1,38	-41,0
	Rq	0,33	-48,9	0,28	4,2	0,60	-6,0	0,20	-40,2
	RSm	138	109,1	40,10	21,6	98,60	49,4	28,70	-18,8

jednostkowych 15 MPa i smarowania olejem nowym 5W40 zwiększyły się względem parametrów chropowatości pierścienia nieeksploatowanego w próbach zużycia (tabela 5.5). Zmiany chropowatości sięgają 8%. Parametr RSm nie uległ znaczącej zmianie - spadek o 0,2% w porównaniu do nowej próbki ulepszonej cieplnie. Chropowatość przeciwpróbki ze stopu łożyskowego współpracującej z pierścieniem ulepszanym cieplnie, poza parametrem RSm uległa znacznemu zmniejszeniu, zmierzone wartości zmniejszyły się w granicach od 61,3 do 72,3% względem nowej przeciwpróbki. Wartość parametru RSm wzrosła o 17,7%. Parametry chropowatości pierścienia z powłoką a-C:H:W zmniejszyły się w zakresie od 12,3% (Ra), do 21,6% (RSm). We współpracujących z pierścieniami z powłoką przeciwpróbkach ze stopu łożyskowego znacząco wzrosły wartości parametrów chropowatości powierzchni Ra – zmiana

o 158,2% i Rq – 135,1%. Chropowatość Rz i RSm wzrosła odpowiednio o 81,4 i 49,8%.

Wszystkie badane parametry chropowatości elementów skojarzenia ciernego z próbkami ulepszanymi cieplnie smarowanych olejem zużyтым 5W40 po próbach zużycia w warunkach nacisków jednostkowych 15 MPa zmniejszyły się (tabela 5.5). Zmiana parametrów chropowatości Ra i Rz powierzchni próbki pierścieniowej ulepszonej cieplnie kształtowała się na poziomie 22,7-23%, a parametrów Rz i RSm: 9,9-12,3% w porównaniu do chropowatości powierzchni nowego pierścienia. W tym skojarzeniu ciernym większe zmiany w strukturze powierzchni warstwy wierzchniej dotyczyły przeciwpróbki ze stopu łożyskowego. Parametry Ra, Rz i Rq zmniejszyły się o 50,3-52,8% względem nieużywanych przeciwpróbek, a parametr RSm o 7,3%. W parze cierniej z pierścieniem z powłoką węglową smarowanej olejem zużyтым 5W40 wystąpiło zmniejszenie chropowatości pierścienia rzędu 25,1-29,9% względem nowej próbki pierścieniowej (parametry Ra, Rz, Rq) oraz 16,2% - parametr RSm. Współpracująca z tym pierścieniem przeciwpróbka ze stopu CuPb30 wykazała znaczący wzrost chropowatości powierzchni: 106,8% w przypadku parametru Ra, 89,7% - Rq oraz 116,7% - RSm. Najmniejszy wzrost wykazał parametr Rz, sięgający 35,5% względem parametru zmierzonego na powierzchni nowej półpanewki.

W skojarzeniu ciernym z pierścieniem ulepszanym cieplnie smarowanym olejem biodegradowalnym 10W40 przy naciskach jednostkowych 15 MPa wystąpiło zwiększenie chropowatości powierzchni pierścienia w porównaniu do pierścienia przed próbami zużycia (tabela 5.5). Wartości parametrów Ra, Rz i Rq wzrosły odpowiednio o 22,1, 42,1 i 67,8%, a średnia szerokość elementów profilu RSm wzrosła o 12,5% względem nowego pierścienia ulepszanego cieplnie. Pomiar chropowatości powierzchni przeciwpróbki ze stopu łożyskowego wykazał spadek parametrów Ra, Rz i Rq rzędu 50,9-58,3% oraz wzrost parametru RSm o 3,5% w porównaniu do wartości zmierzonych na nowej przeciwpróbce. W skojarzeniu ciernym z pierścieniem z powłoką węglową chropowatość powierzchni pierścienia zmniejszyła się. Największy spadek względem wartości zmierzonych na nowej próbce pierścieniowej wykazał parametr Rz – 36,9%, zaś pozostałe parametry (Ra, Rq i RSm) zmniejszyły się od 22,7 do 27,9%. Podobny trend jak w przypadku przeciwpróbek pracujących z pierścieniem ulepszanym cieplnie został zachowany dla przeciwpróbki po próbach zużycia z pierścieniem z powłoką węglową. Parametry Ra, Rz i Rq zmniejszyły się

w mniejszym zakresie (11,3-14,4%), a chropowatość RSm wzrosła o 20,5% względem nowej półpanewki.

Pomiary chropowatości po próbach zużycia pary ciernej z próbkami pierścieniowymi ulepszanymi cieplnie smarowanej olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub> w warunkach pracy z naciskami jednostkowymi 15 MPa wykazały wzrost parametrów Rz, Rq i RSm względem pierścieni nieeksploatowanych (tabela 5.5). Najistotniejszy wzrost dotyczy parametru Rz – 45,6% oraz parametru RSm – 21,6%. Zmiana parametru Rq względem nowego pierścienia ulepszanego cieplnie wyniosła 4,2%, a chropowatość Ra zmniejszyła się o 3,4%. W tej parze ciernej nastąpiło zmniejszenie parametrów chropowatości Ra, Rz i Rq przeciwpróbki ze stopu łożyskowego. Zmniejszenie wartości względem nowej przeciwpróbki sięga 37,9-48,9%. W porównaniu do nowego wycinka półpanewki ponad dwukrotnie wzrósł parametr RSm. W skojarzeniu ciernym z próbką z powłoką a-C:H:W widoczny jest spadek wartości badanych parametrów chropowatości: Ra, Rz i Rq – redukcja o 40,2-41,2%. Nieco mniejszy spadek odnotowano dla parametru RSm – 18,8% względem pierścienia przed próbą zużycia. Zmniejszeniu uległa również większość parametrów chropowatości przeciwpróbki ze stopu CuPb30 – parametry Ra i Rq o 3,5-6% i Rz o 19,3%. Wzrost wartości parametru RSm względem nowej półpanewki wynosi 49,4%.

Eksploatacja pary ciernej w próbach zużycia w warunkach nacisków jednostkowych 20 MPa i smarowania olejem nowym 5W40 spowodowała zmniejszenie wartości parametrów Ra i Rq pierścienia ulepszanego cieplnie odpowiednio o 10,8 i 3,4% oraz wzrost wartości parametrów Rz i RSm o 7 i 3,7% względem pomiarów wykonanych na powierzchni nowego pierścienia ulepszanego cieplnie (tabela 5.6). Chropowatość Ra, Rz i Rq współpracującej w skojarzeniu ciernym z pierścieniem ulepszanym cieplnie przeciwpróbki ze stopu łożyskowego zmniejszyła się od 58,2% do 63,6% względem nowej przeciwpróbki. Bardzo istotnie zmieniła się wartość parametru RSm – nastąpił jedenastokrotny wzrost w porównaniu do wartości sprzed prób zużycia. Pomiary chropowatości próbki pierścieniowej z powłoką a-C:H:W wykazały niewielki spadek parametrów Ra i Rq – 3,3 i 9,3% oraz intensywniejszy spadek, dotyczący chropowatości Rz i Rsm – 17,7 oraz 16,2% względem nowego pierścienia z powłoką. Parametry powierzchni współpracującego z tym pierścieniem fragmentu łożyska ślizgowego uległy znaczącemu zwiększeniu. Parametry chropowatości Ra, Rz i Rq wzrosły od 76,3 do 135,1% względem nowej przeciwpróbki, a parametr RSm zwiększył się o 68,2%.

Chropowatość Rz, Rq i RSm próbki pierścieniowej ulepszonej cieplnie pracującej z przeciwpróbką ze stopu CuPb30 z naciskami jednostkowymi 20 MPa w obecności oleju zużytego 5W40 zwiększyła się od 10,2 do 23,7% (tabela 5.6). Nieznacznie zmniejszył się parametr Ra – o 5,4% względem nowego pierścienia ulepszanego cieplnie. Spadły natomiast wartości chropowatości powierzchni przeciwpróbki pracującej w skojarzeniu z pierścieniem bez powłoki. Zmiany procentowe parametrów Ra, Rz i Rq wyniosły 34,6-38%, a parametru RSm – 15,9% względem przeciwpróbki przed próbami zużycia. W skojarzeniu ciernym z próbkami z powłoką węglową nastąpił spadek wartości wszystkich badanych parametrów chropowatości pierścienia. Największa zmiana dotyczy chropowatości Rz i wynosi 23,7%, nieco mniejsza – Ra i Rq – 13,2-15,3%, natomiast najmniejsza – RSm – 7,2%. Intensywniejsze zmiany w strukturze warstwy powierzchniowej wystąpiły we współpracującym z pierścieniem z powłoką wycinku łożyska ślizgowego – zmniejszeniu uległa chropowatość Ra, Rz i Rq – odpowiednio o 34,3, 60,1 i 43,9%. Zwiększyła się natomiast wartość parametru RSm – wzrost o 39,7% w porównaniu do nieeksploatowanej powierzchni.

W skojarzeniu ciernym próbka pierścieniowa ulepszana cieplnie – przeciwpróbka ze stopu łożyskowego smarowanym olejem biodegradowalnym 10W40 trendy zmian parametrów chropowatości obu elementów pary ciernej są identyczne (tabela 5.6). Chropowatość Ra i Rq pierścienia ulepszanego cieplnie spadła o 19,6 i 11,4%, nieznacznie spadła także wartość parametru Rz – 4,7% względem nieużywanej powierzchni. Wzrosła natomiast wartość chropowatości RSm – zmiana procentowa wyniosła 4,3%. W przypadku przeciwpróbki ze stopu CuPb30 zmiany procentowe parametrów Ra, Rz i Rq względem nowej przeciwpróbki wykazały spadek rzędu 6,2-23%. Niemal o 100% zwiększyła się wartość chropowatości RSm. W skojarzeniu ciernym z próbkami z powłoką węglową wszystkie mierzone parametry chropowatości pierścienia zmniejszyły się od 4,5 do 26,7%. Największe zmiany chropowatości współpracujących z pierścieniami z powłoką węglową przeciwpróbek ze stopu łożyskowego dotyczą parametrów Ra – redukcja o 25,6% i Rq – spadek o 16,9%. Chropowatość Rz i Rq nie uległy znaczącym zmianom – wzrost parametru RSm i spadek parametru Rz nie przekroczyły 1% w porównaniu do wyników uzyskanych dla przeciwpróbek nowych.

W parze ciernej smarowanej olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu MoS<sub>2</sub> po próbach zużycia przy naciskach jednostkowych 20 MPa

chropowatość powierzchni próbki pierścieniowej ulepszonej cieplnie zmieniła się nieznacznie względem nowych próbek. Zmniejszeniu o 1,5% uległ parametr Ra, natomiast parametry Rz, Rq i RSm zwiększyły się w zakresie od 3,8 do 5,9%.

Tabela 5.6. Parametry chropowatości elementów par ciernych rolka-kłoczek po próbach zużycia w styku rozłożonym – nacisk jednostkowy 20 MPa

Kompozycja pary ciernej		Próbka pierścieniowa ulepszana cieplnie – przeciwpróbka CuPb30				Próbka pierścieniowa z powłoką a-C:H:W – przeciwpróbka CuPb30			
Element pary ciernej		Przeciwpróbka		Pierścień		Przeciwpróbka		Pierścień	
Olej	Parametr chropowatości	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]
5W40 Nowy	Ra	0,18	-58,2	0,18	-10,8	0,99	133,3	0,24	-3,3
	Rz	1,64	-63,6	1,83	7,0	7,95	76,3	1,93	-17,7
	Rq	0,26	-59,6	0,26	-3,4	1,50	135,1	0,30	-9,3
	RSm	729	1004,5	34,20	3,7	111	68,2	29,60	-16,2
5W40 Zużyty	Ra	0,26	-38,0	0,19	-5,4	0,28	-34,3	0,21	-13,2
	Rz	2,95	-34,6	2,03	18,7	1,80	-60,1	1,79	-23,7
	Rq	0,40	-37,8	0,29	10,2	0,36	-43,9	0,28	-15,3
	RSm	55,50	-15,9	40,80	23,7	92,20	39,7	32,80	-7,2
10W40 Bio	Ra	0,33	-23,0	0,16	-19,6	0,32	-25,6	0,23	-4,5
	Rz	4,23	-6,2	1,63	-4,7	4,47	-0,9	1,72	-26,7
	Rq	0,58	-8,8	0,23	-11,4	0,53	-16,9	0,30	-11,4
	RSm	131	98,5	34,40	4,3	66,50	0,8	32,20	-8,9
PAO8 + MoS <sub>2</sub>	Ra	0,42	-1,6	0,20	-1,5	0,23	-46,7	0,15	-39,9
	Rz	6,06	34,4	1,81	5,8	1,80	-60,1	1,41	-39,9
	Rq	0,75	17,9	0,27	3,8	0,30	-53,0	0,20	-41,1
	RSm	109	65,2	34,90	5,9	62,10	-5,9	26,20	-25,8

Taki sam charakter zmian chropowatości powierzchni widoczny jest dla przeciwpróbki ze stopu łożyskowego współpracującego w tej parze ciernej z pierścieniem ulepszanym cieplnie, w którym parametr Ra zmniejszył się o 1,6%. Intensywniejsze zmiany obserwowane są w przypadku pozostałych parametrów – najbardziej wzrosła chropowatość RSm – zmiana o 65,2%, następnie Rz – 34,4% i Rq – 17,9%. W skojarzeniu ciernym z próbkami pierścieniowymi z powłoką a-C:H:W chropowatość powierzchni obu elementów skojarzenia wyrażona badanymi parametrami uległa zmniejszeniu. Parametry Ra, Rz i Rq pierścienia z powłoką węglową zmniejszyły się o 39,9-41,1%, a parametr RSm o 25,8%. Chropowatość

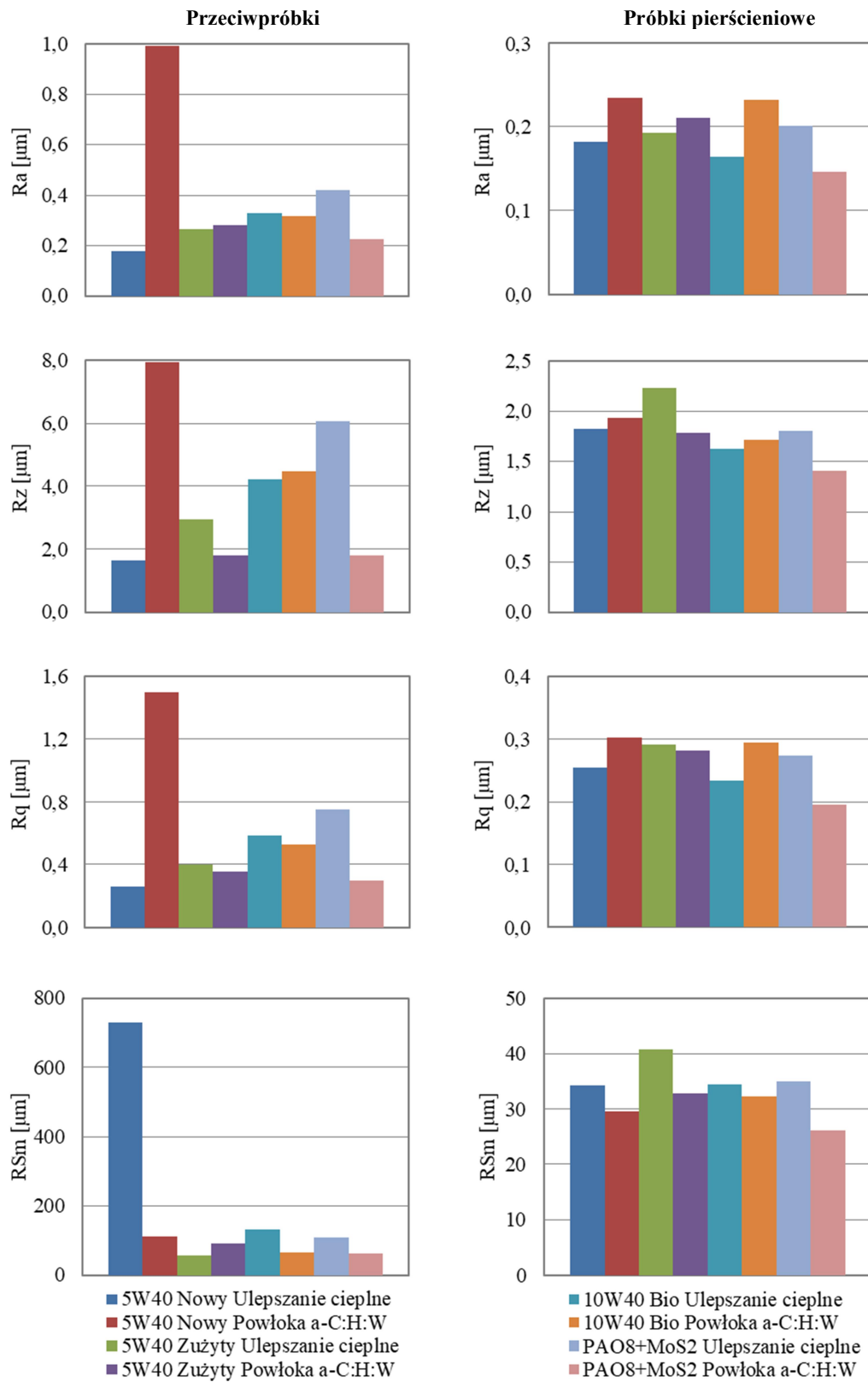
powierzchni Ra, Rz i Rq współpracującej z tym pierścieniem przeciwpróbki ze stopu CuPb30 zmniejszyła się o 46,7-60,1% względem nowej przeciwpróbki, a parametr RSm zmniejszył się o 5,9%.

Wpływ eksploatacji oleju 5W40 w silniku spalinowym na parametry chropowatości elementów pary ciernej z próbkami ulepszanymi cieplnie jest korzystny. W zakresie nacisków jednostkowych 10 i 15 MPa widoczne jest zmniejszenie chropowatości zarówno próbek pierścieniowych jak i przeciwpróbek względem wartości zmierzonych dla elementów smarowanych olejem nowym 5W40. W zakresie maksymalnego nacisku jednostkowego 20 MPa obserwowany jest wzrost parametrów Rz, Rq i RSm powierzchni pierścienia ulepszanych cieplnie (tabele 5.4-5.6).

Pomiary chropowatości elementów par ciernych pracujących w próbach zużycia przy naciskach jednostkowych 20 MPa w obecności oleju nowego 5W40 wykazały znaczny wzrost parametrów Ra, Rz i Rq powierzchni przeciwpróbki ze stopu CuPb30 w skojarzeniu ciernym z pierścieniem z powłoką a-C:H:W, w porównaniu do pary ciernej z pierścieniem ulepszanym cieplnie (rys. 5.14). Parametry Ra i Rq wzrosły niemal sześciokrotnie względem przeciwpróbki pracującej z pierścieniem bez powłoki, zaś parametr Rz wzrósł prawie pięciokrotnie. Odwrotna tendencja wystąpiła dla parametru RSm, jego wartość zmierzona dla przeciwpróbki pracującej z pierścieniem ulepszanym cieplnie jest ponad sześć razy większa niż w przypadku przeciwpróbki po eksploatacji z pierścieniem z powłoką a-C:H:W. Chropowatość powierzchni Ra, Rz i Rq pierścienia z powłoką po próbach zużycia w warunkach smarowania olejem nowym 5W40 wzrosła w zakresie od 5,5% (Rz) do 29,1% (Ra) w porównaniu do pierścienia ulepszanego cieplnie pracującego w tych próbach. Parametr RSm pierścienia z powłoką został zredukowany o 13,5% w porównaniu do pierścienia ulepszanego cieplnie.

W parze ciernej smarowanej olejem użytym 5W40 chropowatość Ra przeciwpróbki ze stopu CuPb30 pracującej z próbką z powłoką węglową wzrosła o 6% w porównaniu do przeciwpróbki pracującej z pierścieniem ulepszanym cieplnie (rys. 5.14). O 66,1% wzrosła chropowatość RSm, zmniejszyła się natomiast chropowatość Rq – spadek o 9,8%. Największa zmiana dotyczyła parametru Rz, który zmniejszył się o 40% względem przeciwpróbki po eksploatacji z pierścieniem ulepszanym cieplnie. Chropowatość Rz, Rq i RSm pierścienia z powłoką a-C:H:W zmniejszyła się – spadki wartości względem próbki ulepszanej cieplnie mieszczą się w zakresie 3,1-19,7%, natomiast chropowatość Ra wzrosła o 9,3%.





Rysunek 5.14. Parametry chropowatości Ra, Rz, Rq i RSm przeciwpórek ze stopu łożyskowego CuPb30 i próbek pierścieniowych ulepszanych cieplnie oraz z powłoką a-C:H:W po próbach zużycia w styku rozłożonym przy smarowaniu badanymi olejami, nacisk jednostkowy 20 MPa

W skojarzeniu ciernym smarowanym olejem biodegradowalnym 10W40 w warunkach pracy z naciskami jednostkowymi 20 MPa chropowatość Ra, Rq i RSm powierzchni przeciwpróbki współpracującej z pierścieniem z powłoką a-C:H:W zmniejszyła się w porównaniu do powierzchni przeciwpróbki po próbach zużycia z pierścieniem ulepszanym cieplnie (rys. 5.14). Zmiany procentowe chropowatości Ra i Rq oscylują w granicach 3,4-8,9%. Największa zmiana dotyczy parametru RSm, który zmniejszył się względem przeciwpróbki po eksploatacji z pierścieniem ulepszanym cieplnie o 49,2%. Wzrost parametru Rz jest niewielki i wynosi 5,7% względem przeciwpróbki po próbach z pierścieniem ulepszanym cieplnie. Chropowatość powierzchni Ra, Rz i Rq pierścienia z powłoką a-C:H:W po próbach zużycia w styku rozłożonym jest wyższa niż w przypadku pierścienia ulepszanego cieplnie po tych próbach. Najmniejszy wzrost chropowatości zmierzono dla parametru Rz – 5,5%, największy dla parametru Ra – 41,5%. Zmniejszeniu o 6,4% względem pierścienia ulepszanego cieplnie po próbach zużycia uległa chropowatość RSm.

Pomiary chropowatości powierzchni elementów par ciernych smarowanych olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu przy naciskach 20 MPa wykazały spadek wartości wszystkich badanych parametrów w parze cierniej z pierścieniem z powłoką a-C:H:W w porównaniu do pary cierniej z pierścieniem ulepszanym cieplnie (rys. 5.14). Parametry chropowatości przeciwpróbki pracującej w próbach zużycia z pierścieniem z powłoką a-C:H:W zmniejszyły się od 43% (RSm) do 70,3% (Rz) względem przeciwpróbki eksploatowanej z próbką ulepszaną cieplnie.

Chropowatość pierścienia z powłoką węglową zmniejszyła się w zakresie od 22,1 do 28,5% dla badanych parametrów względem chropowatości próbki ulepszanej cieplnie po próbach zużycia. Wartości chropowatości pierścienia z powłoką a-C:H:W smarowanego olejem PAO + MoS<sub>2</sub> są najniższe spośród badanych olejów. Podobnie jest w przypadku parametrów zmierzonych dla przeciwpróbki ze stopu łożyskowego, która osiąga jedne z najniższych wartości w badanych parach ciernych.

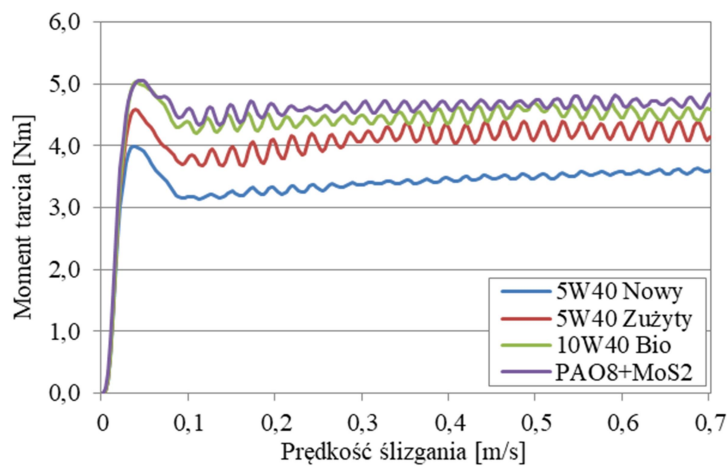
## **5.2. Procesy tribologiczne w węzłach ciernych o styku niekonforemnym**

### **5.2.1. Analiza parametrów tarcia pary cierniej**

#### **Rozruch pary cierniej**

Przebiegi momentu tarcia w funkcji prędkości ślizgania w parach ciernych o styku liniowym z utwardzonymi powierzchniowo płytkami do regulacji luzów zaworowych mają niemal identyczny charakter zmian (rys. 5.15). Podczas rozruchu

pary ciernej występuje intensywny wzrost momentu tarcia, a po osiągnięciu maksimum wartości (momentu rozruchowego) następuje nieznaczny jego spadek i przejście w fazę stabilizacji.

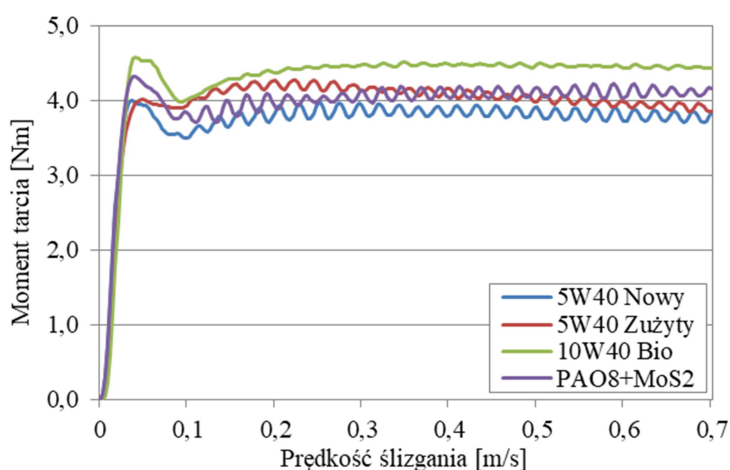


Rysunek 5.15. Moment rozruchowy w parach ciernych z płytkami zaworowymi utwardzonymi powierzchniowo w funkcji prędkości ślizgania i rodzaju oleju smarującego, siła nacisku 3000 N

Najkorzystniejszy przebieg momentu tarcia podczas rozruchu pary ciernej z płytkami utwardzonymi powierzchniowo wykazała para smarowana olejem nowym 5W40. Przebieg ten charakteryzuje najniższy moment rozruchowy (4 Nm) oraz najniższy poziom oporów ruchu w fazie stabilizacji spośród par ciernych smarowanych badanymi olejami. Maksymalny moment tarcia ustalony dla pary smarowanej olejem nowym 5W40 jest o 0,6 Nm niższy, niż dla pary smarowanej olejem zużytym 5W40. W fazie stabilizacji zauważalne są mniejsze wahania momentu tarcia, a wartości stabilizują się na niższym poziomie w porównaniu do pary ciernej smarowanej olejem zużytym 5W40. Para cierna smarowana olejem biodegradowalnym 10W40 osiąga podczas rozruchu moment tarcia równy 5,03 Nm, a przebieg wykresu zbliżony jest do wykresu uzyskanego dla pary smarowanej olejem zużytym 5W40. Niemal identyczne do oleju biodegradowalnego 10W40 wartości momentu rozruchowego zarejestrowano podczas rozruchu pary ciernej smarowanej kompozycją oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> – 5,06 Nm. W przypadku smarowania pary ciernej tym olejem w fazie stabilizacji moment tarcia osiąga najwyższe wartości pod koniec próby spośród badanych kompozycji ciernych – 4,7 Nm (rys. 5.15).

Analizując wykresy uzyskane dla par ciernych z płytkami zaworowymi pokrytymi powłoką a-C:H:W widoczna jest zmiana kształtu charakterystyk w porównaniu do odpowiadających im wykresów uzyskanych dla par z płytkami

zaworowymi utwardzonymi powierzchniowo (rys. 5.16). Smarowanie skojarzenia ciernego olejem nowym 5W40 spowodowało, że moment rozruchowy osiągnął identyczną wartość jak w przypadku zastosowania płytki zaworowej utwardzanej powierzchniowo – 4 Nm. W trakcie pracy pary cierniej smarowanej olejem zużyтым 5W40 moment rozruchowy został zredukowany o 0,55 Nm względem momentu zarejestrowanego w trakcie rozruchu pary z płytką utwardzaną powierzchniowo i osiągnął wartość 4,05 Nm. Wartości momentu tarcia w początkowej fazie ruchu par ciernych smarowanych olejem nowym i olejem zużyтым 5W40 zrównały się z sobą, różnice występują w fazie stabilizacji momentu tarcia – wyższe wartości osiąga para smarowana olejem zużyтым 5W40.



Rysunek 5.16. Moment rozruchowy w parach ciernych z płytkami zaworowymi z powłoką a-C:H:W w funkcji prędkości ślizgania i rodzaju oleju smarującego, siła nacisku 3000 N

W przypadku smarowania obszaru tarcia olejem biodegradowalnym 10W40 wartość momentu rozruchowego została ograniczona względem pary z płytkami bez powłoki a-C:H:W o 0,44 Nm. W fazie stabilizacji widoczne są niewielkie wahania momentu tarcia – najniższe spośród badanych par ciernych smarowanych badanymi olejami dla obu typów płytek regulacyjnych. Kształt charakterystyki momentu tarcia pary cierniej smarowanej olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu zbliżony jest do kształtu zarejestrowanego dla par smarowanych nowymi olejami handlowymi (nowy 5W40, biodegradowalny 10W40) (rys. 5.15 i 5.16). Analizując rys. 5.15 i 5.16 można stwierdzić, iż rozruch par ciernych z płytkami pokrytymi powłoką a-C:H:W ma stabilniejszy przebieg w porównaniu do par ciernych z utwardzonymi powierzchniowo płytkami do regulacji luzu zaworowego.

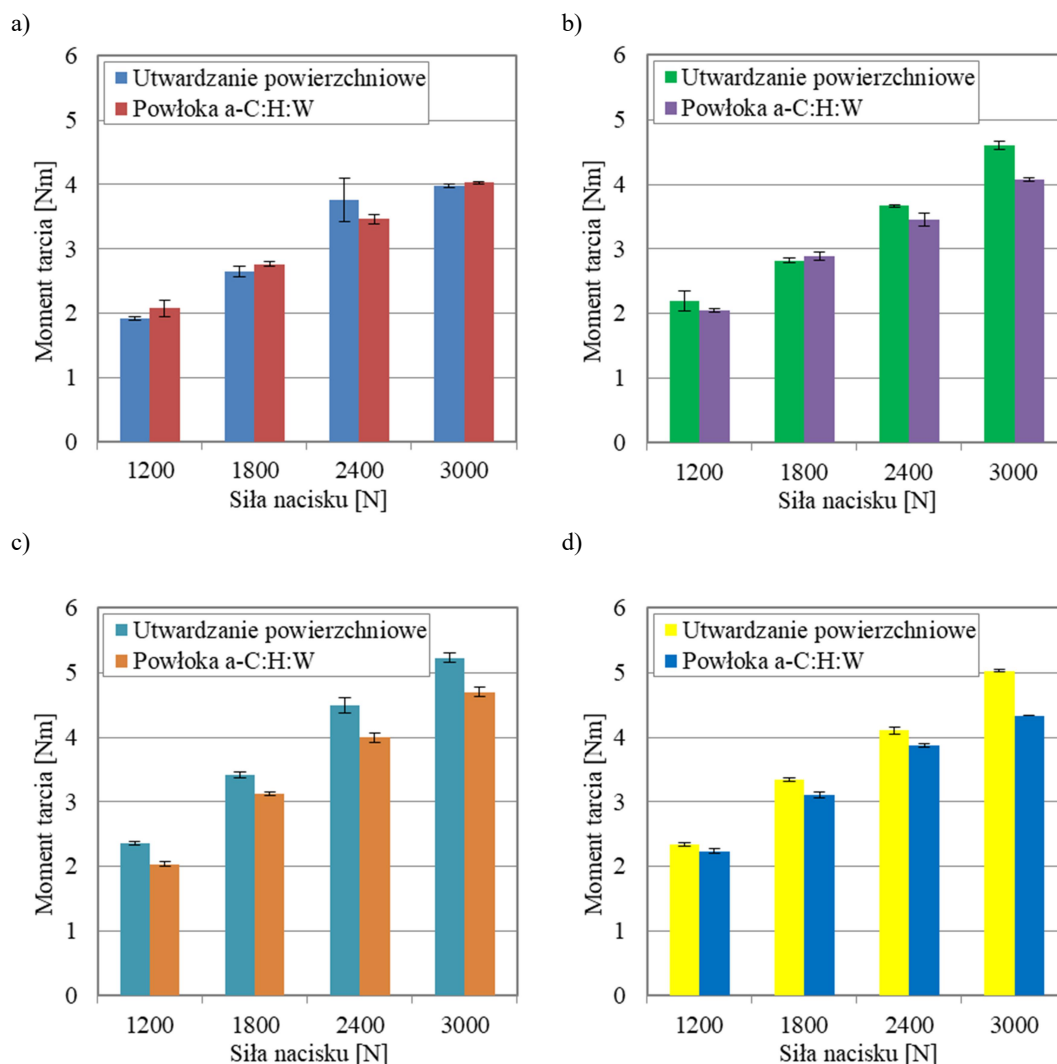
Zarejestrowane podczas prób rozruchu siły tarcia zastosowano do określenia maksymalnego momentu tarcia w parach ciernych w funkcji siły nacisku i rodzaju czynnika smarującego (tabela 5.7).

Tabela 5.7. Moment rozruchowy podczas rozruchu wężła ciernego rolka-kłosek w styku liniowym [Nm]

Kompozycja pary cierniej								
Siła nacisku [N]	Płytką zaworową utwardzaną powierzchniowo				Płytką zaworową z powłoką a-C:H:W			
	Rodzaj oleju							
	5W40 Nowy	5W40 Zużyty	10W40 Bio	PAO8 + MoS <sub>2</sub>	5W40 Nowy	5W40 Zużyty	10W40 Bio	PAO8 + MoS <sub>2</sub>
1200	1,91	2,20	2,36	2,34	2,08	2,05	2,04	2,24
1800	2,65	2,82	3,42	3,35	2,76	2,88	3,13	3,11
2400	3,77	3,67	4,49	4,11	3,47	3,46	4,00	3,87
3000	3,99	4,60	5,23	5,03	4,03	4,08	4,70	4,34

Moment rozruchowy w parze cierniej z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W smarowanej olejem nowym 5W40 wskazuje na nieznaczny wzrost oporów tarcia przy naciskach 1200, 1800 i 3000 N w porównaniu do pary z płytką bez powłoki (rys. 5.17a). Podczas pracy z siłą nacisku 2400 N zarejestrowano spadek momentu rzędu 8% w porównaniu do skojarzenia ciernego z płytką zaworową utwardzaną powierzchniowo. Skojarzenie cierne smarowane olejem zużytym 5W40 posiada mniejsze opory rozruchu w przypadku zastosowania płytki z powłoką węglową przy naciskach 1200, 2400 i 3000 N (rys. 5.17b). Przy nacisku 1800 N występuje nieznaczny wzrost momentu tarcia w obszarze tarcia w porównaniu do pary z płytką zaworową utwardzaną powierzchniowo. Po zastosowaniu powłoki a-C:H:W wartości momentu rozruchowego dla oleju nowego i zużytego 5W40 są niemal identyczne – co wskazuje na zbliżone warunki tarcia w węźle ciernym niezależnie od stopnia zużycia oleju. Para cierna smarowana olejem biodegradowalnym 10W40 wykazuje spadek momentu rozruchowego po zastosowaniu na warstwę powierzchniową płytki regulacyjnej powłoki a-C:H:W, w każdym badanym przypadku siły obciążającej węzeł tarcia (rys. 5.17c). Również w parze cierniej smarowanej kompozycją oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> obserwowany jest spadek momentu rozruchowego po zastosowaniu na powierzchni płytki zaworowej powłoki węglowej (rys. 5.17d). Przy minimalnej sile nacisku spadek momentu rozruchowego względem pary z płytką utwardzaną powierzchniowo jest niewielki i wynosi 0,1 Nm, zaś w zakresie sił nacisku 1800-2400 N wynosi on 0,24 Nm.

Redukcja wartości momentu rozruchowego jest najbardziej widoczna przy sile nacisku 3000 N i wynosi w tych warunkach 0,69 Nm – jest to największy spadek spośród badanych par ciernych.

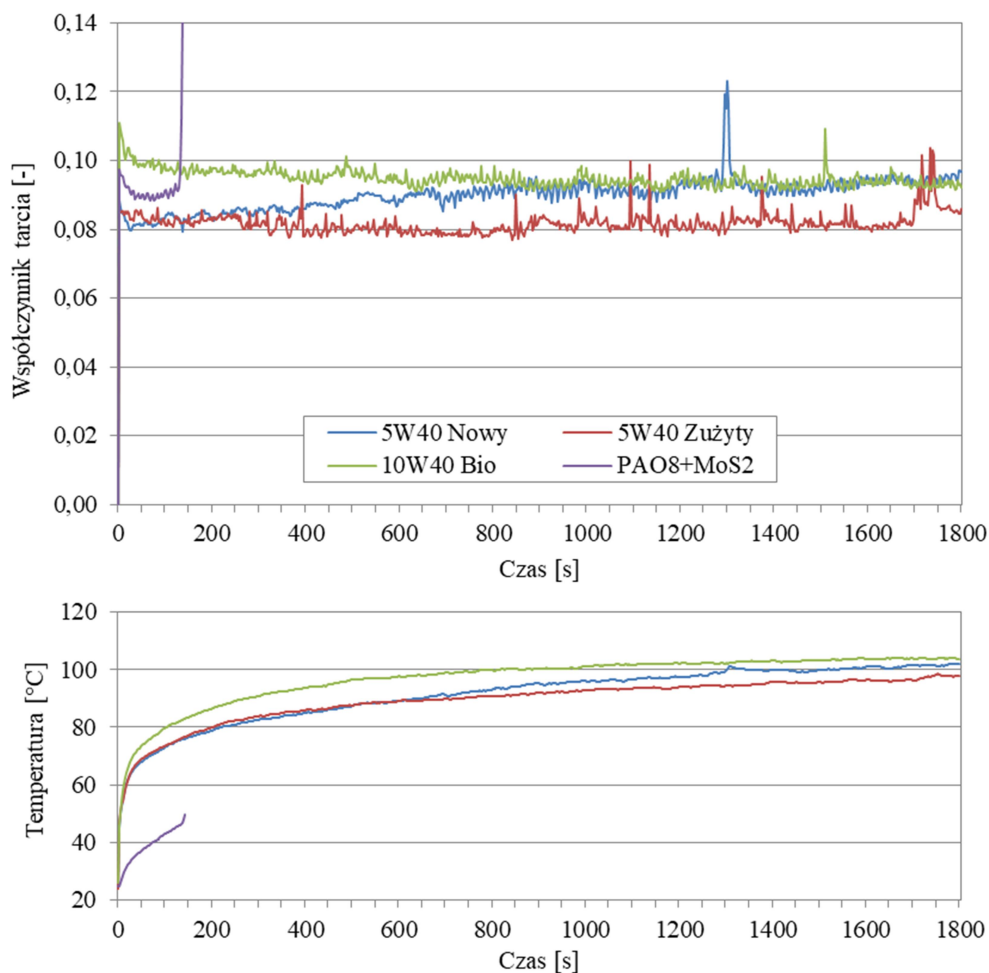


Rysunek 5.17. Moment rozruchowy w funkcji siły nacisku w styku liniowym, w zależności od ukształtowanej warstwy powierzchniowej i oleju smarującego: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS<sub>2</sub>

Zastosowanie powłoki węglowej na powierzchni płytki zaworowej w większości przypadków poprawia warunki rozruchu pary ciernej w skojarzeniu próbka pierścieniowa – płytka zaworowa.

### Zużycie pary ciernej w styku liniowym

W trakcie prób zużycia w styku liniowym zarejestrowano przebiegi siły tarcia i temperatury w obszarze tarcia par ciernych w funkcji czasu. Zarejestrowane wartości siły tarcia umożliwiły wyznaczenie przebiegów współczynnika tarcia (rys. 5.18-5.19).



Rysunek 5.18. Współczynnik tarcia i temperatura w obszarze tarcia w parach ciernych z płytkami zaworowymi utwardzonymi powierzchniowo przy smarowaniu badanymi olejami, siła nacisku 3000 N

Para cierna z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo smarowana olejem nowym 5W40 w trakcie prób zużycia przy sile nacisku 3000 N wykazuje tendencje do stopniowego wzrostu oporów tarcia. Po 1300 s od rozpoczęcia próby wystąpił skokowy wzrost współczynnika tarcia, mogący świadczyć o krótkotrwałym procesie zacierania pary cierniej. Zjawisko to zarejestrowano podczas wszystkich prób z tym olejem w zbliżonym przedziale czasowym próby. Zmiany współczynnika tarcia w parze smarowanej olejem zużytym 5W40 w porównaniu do oleju nowego wykazują większą niestabilność. Pierwszy istotny skok wartości współczynnika tarcia pojawia się już po 395 s od rozpoczęcia próby, następny w połowie próby i powtarza się losowo, aż do zakończenia badania. Spośród badanych olejów najstabilniejsze przebiegi rejestrowano dla par smarowanych olejem biodegradowalnym 10W40. Po osiągnięciu maksimum wartości współczynnika tarcia występuje nieznaczny spadek jego wartości, a następnie jego stabilizacja (jedeny skok wartości współczynnika wystąpił w 1510 s trwania

próby). Badanie pary ciernej smarowanej olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub> zakończyło się po 120 s zatarciem pary ciernej, pomimo początkowej stabilizacji współczynnika tarcia na poziomie 0,09 (rys. 5.18). Pozostałe biegi badawcze tej pary z użyciem nowych próbek pierścieniowych również kończyły się nieoczekiwanym zatarciem pary ciernej po upływie 140 i 165 s.

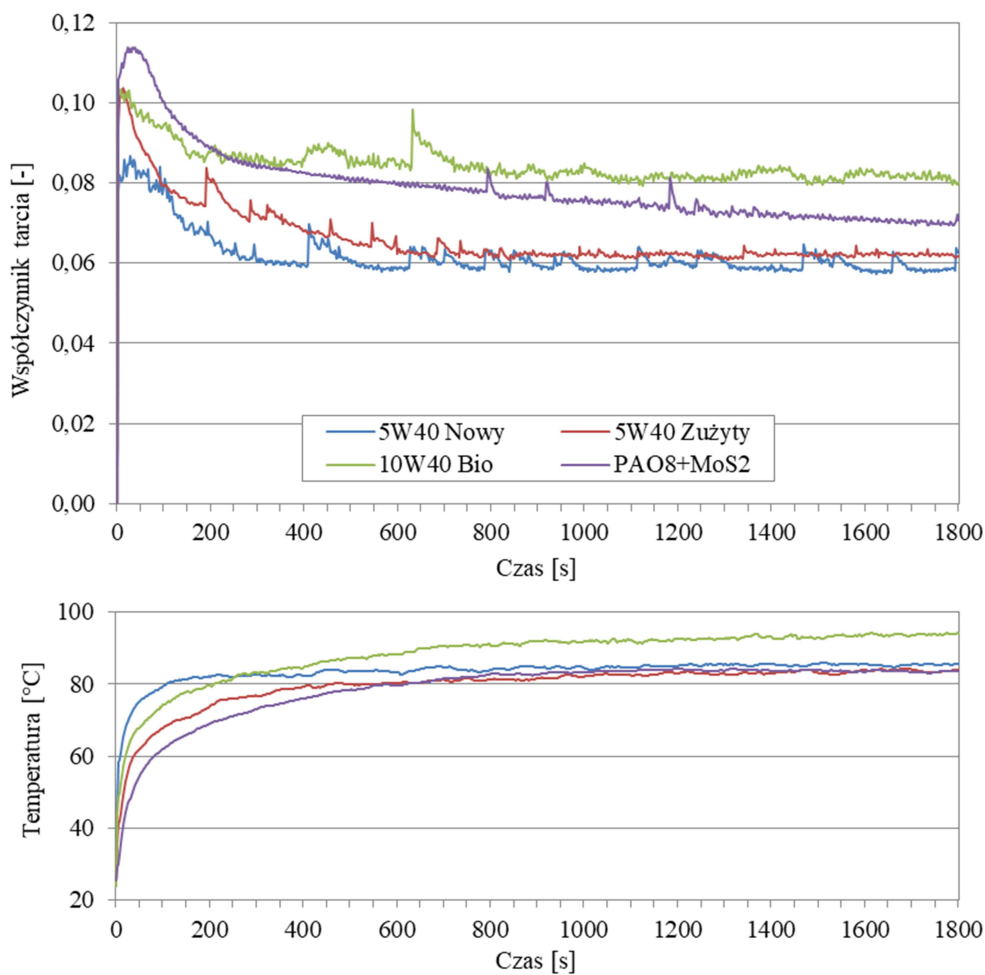
Zmiany temperatury w obszarze tarcia uzyskane dla par ciernych smarowanych olejami klasy 5W40 są niemal identyczne do ok. 750 s czasu trwania próby, następnie temperatura wzrasta szybciej w parze smarowanej olejem nowym 5W40. Para cierna smarowana olejem biodegradowalnym 10W40 szybciej osiąga wyższe temperatury w porównaniu do olejów klasy 5W40, aczkolwiek wartości średnie pod koniec próby kształtują się na podobnym poziomie. Temperatura w obszarze tarcia pod koniec prób zużycia wynosiła 101,9°C w parze ciernej smarowanej olejem nowym 5W40 i 97,7°C w parze smarowanej olejem zużyтым 5W40. Skojarzenie cierne pracujące w obecności oleju biodegradowalnego 10W40 osiągnęło temperaturę – 103,9°C – najwyższą spośród badanych w parach ciernych z płytkami utwardzanymi powierzchniowo. Para cierna smarowana olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu w momencie zatarcia (120 s) osiągnęła temperaturę 46,4°C.

Na rys. 5.19 zestawiono przebiegi współczynnika tarcia i temperatury uzyskane podczas prób zużycia par ciernych z płytkami zaworowymi pokrytymi powłoką a-C:H:W w warunkach pracy z siłą nacisku 3000 N. Para cierna smarowana olejem nowym 5W40 uzyskała najniższy współczynnik tarcia podczas rozruchu spośród par z płytkami z powłoką a-C:H:W, który wyniósł 0,087. W tej parze stabilizacja współczynnika tarcia nastąpiła po ok. 520 s osiągając wartość 0,059. Poziom ten został utrzymany do końca próby, przy czym od 410 s próby występują nieregularne skoki wartości współczynnika tarcia rzędu 0,006. Przebieg uzyskany podczas prób zużycia pary ciernej smarowanej olejem zużyтым 5W40 w porównaniu do oleju nowego 5W40 osiąga wyższą wartość współczynnika tarcia w trakcie rozruchu – 0,104. Największe skoki wartości współczynnika tarcia pojawiają się w przedziale 180 - 600 s i osiągają one wartości od 0,004 do 0,009.

Współczynnik tarcia w tej parze w porównaniu do pary smarowanej olejem nowym 5W40 stabilizuje się później i następuje to w 600 s próby. Współczynnik tarcia pod koniec próby jest nieznacznie wyższy (0,062), ale w trakcie próby nie występują nagłe wzrosty wartości jak ma to miejsce w przypadku pary ciernej smarowanej olejem nowym 5W40. Współczynnik tarcia podczas rozruchu pary ciernej smarowanej olejem



biodegradowalnym 10W40 jest niemal identyczny jak dla oleju zużytego 5W40 i wynosi 0,103 (rys. 5.19).



Rysunek 5.19. Współczynnik tarcia i temperatura w obszarze tarcia w parach ciernych z płytkami zaworowymi z powłoką a-C:H:W przy smarowaniu badanymi olejami, siła nacisku 3000 N

W trakcie próby po 632 s zarejestrowano skok współczynnika tarcia do wartości zbliżonej do uzyskanej w trakcie rozruchu, po czym poziom oporów ruchu wrócił do poprzedniego poziomu i ustabilizował się do końca próby. Wartość współczynnika tarcia w parze smarowanej olejem biodegradowalnym 10W40 stabilizuje się na najwyższym poziomie spośród badanych olejów osiągając wartość 0,081. Zastosowanie powłoki a-C:H:W na powierzchni regulatora luzu zaworowego umożliwiło przeprowadzenie całego biegu badawczego pary ciernej smarowanej olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu. Współczynnik tarcia w trakcie rozruchu osiągnął najwyższą wartość spośród badanych par ciernych i wyniósł on 0,114. Po osiągnięciu wartości maksymalnej w trakcie rozruchu pary ciernej występuje powolny, łagodny spadek wartości współczynnika tarcia. Charakterystyczny dla tej kompozycji

parcy cierniej jest brak stabilizacji współczynnika tarcia – wartość stopniowo maleje w trakcie trwania próby. Procesy tarcia w parze z powłoką a-C:H:W intensywnie stabilizują się przy smarowaniu kompozycją oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub>, następnie przy smarowaniu olejem zużytym 5W40 i olejem nowym 5W40. Najmniej stabilnie pracowała para cierna smarowana olejem biodegradowalnym 10W40. W porównaniu do par ciernych z płytkami utwardzonymi powierzchniowo procesy zużycia w parach z powłoką a-C:H:W przebiegają mniej intensywnie. W trakcie trwania prób rzadziej występują skokowe zmiany współczynnika tarcia. Występujące wzrosty są sporadyczne, a wahania wartości zawierają się w węższym zakresie. Charakterystyczne dla par ciernych z płytkami z powłoką a-C:H:W jest dłuższy okres stabilizacji współczynnika tarcia po rozruchu połączony z łagodnym spadkiem wartości w porównaniu do par z płytkami zaworowymi utwardzonymi powierzchniowo.

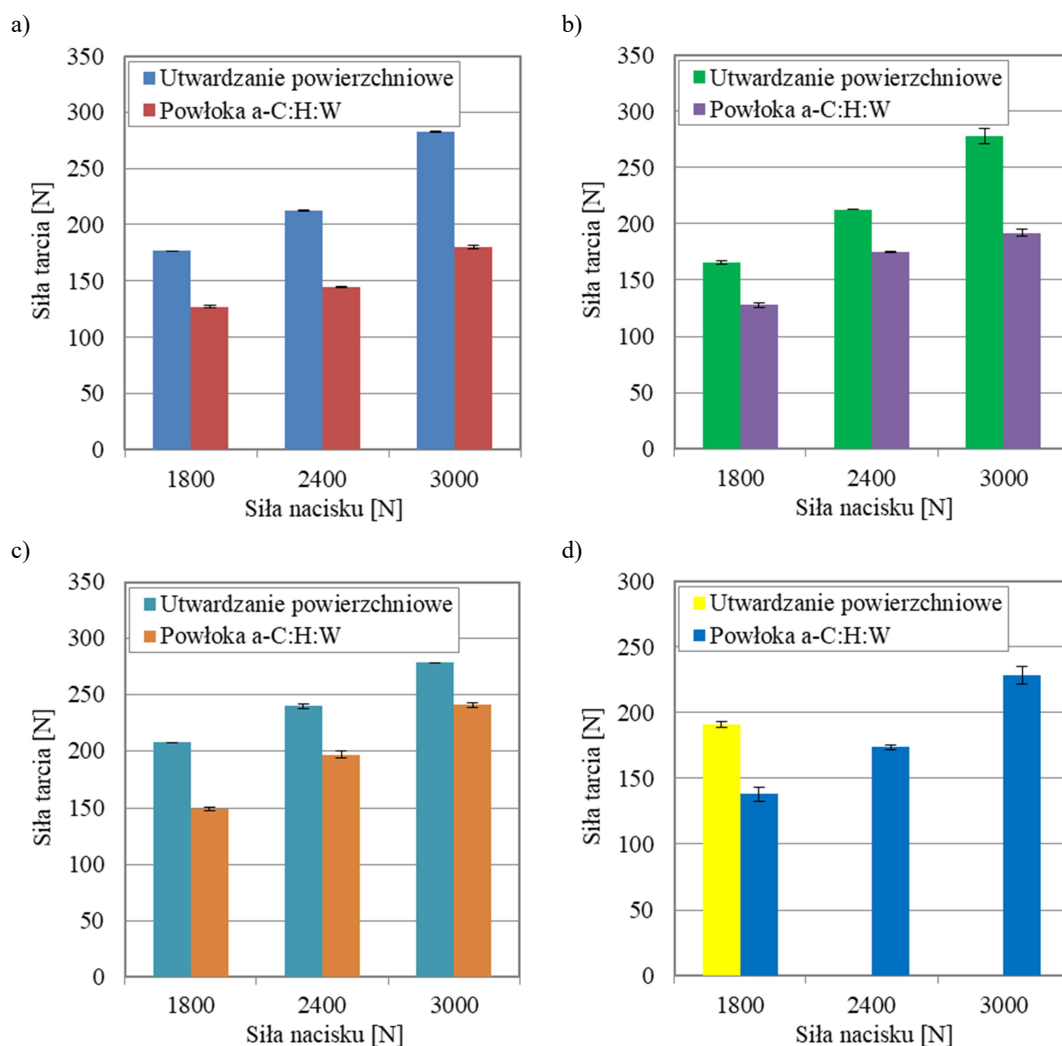
W parach ciernych z płytkami z powłoką a-C:H:W obserwowany jest wyraźny spadek wartości temperatur w stosunku do par z płytkami bez powłoki. Temperatury w obszarze tarcia w parach smarowanych olejami klasy 5W40 (nowy i zużyty) oraz kompozycji PAO8 + MoS<sub>2</sub> stabilizują się na zbliżonym poziomie – 83,5-85,4°C. Najwyższa temperatura występuje w parach smarowanych olejem biodegradowalnym 10W40 – 93,9°C. Jest to jednak wartość o 10°C niższa w porównaniu do zmierzonej w skojarzeniu z płytkami zaworowymi bez powłoki węglowej.

Tabela 5.8. Siła tarcia i temperatura w obszarze tarcia w funkcji siły nacisku w trakcie prób zużycia węzła ciernego rolka-kłoczek w styku liniowym (n=100 obr/min, t=1800 s),  
\* - wartość w momencie przerwania próby

Siła nacisku [N]	Płytki zaworowa utwardzana powierzchniowo				Płytki zaworowa z powłoką a-C:H:W			
	Rodzaj oleju							
	5W40 Nowy	5W40 Zużyty	10W40 Bio	PAO8 + MoS <sub>2</sub>	5W40 Nowy	5W40 Zużyty	10W40 Bio	PAO8 + MoS <sub>2</sub>
<b>Siła tarcia [N]</b>								
1800	176,5	165,4	208,0	190,9	127,0	127,7	148,6	138,0
2400	212,4	212,8	240,1	-	144,7	174,8	197,2	173,8
3000	282,7	277,9	278,6	-	180,5	192,0	241,1	228,3
<b>Temperatura [°C]</b>								
1800	74,5	67,8	78,6	74,6	63,9	62,1	70,9	64,6
2400	85,1	85,2	94,4	82,3*	73,7	67,6	76,2	75,1
3000	101,8	103,3	102,4	48,3*	83,6	81,6	92,8	84,7

W końcowym etapie prób zarejestrowano średnią siłę tarcia oraz temperaturę w obszarze tarcia badanych par ciernych (tabela 5.8).

Zastosowanie powłoki a-C:H:W na warstwę powierzchniową płytek zaworowych spowodowało spadek siły tarcia w parach ciernych smarowanych badanymi olejami w porównaniu do wyników uzyskanych dla par z płytkami utwardzonymi powierzchniowo (rys. 5.20). Siła tarcia pod koniec prób zużycia par ciernych smarowanych olejem nowym 5W40 po zastosowaniu powłoki a-C:H:W na powierzchni płytek spadła o 28% przy sile nacisku równej 1800 N, o 32% przy 2400 N i o 36,2% przy 3000 N względem par z płytkami utwardzonymi powierzchniowo (rys. 5.20a).



Rysunek 5.20. Siła tarcia w parach ciernych z płytkami utwardzonymi powierzchniowo i pokrytymi powłoką a-C:H:W w styku liniowym przy smarowaniu olejami: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS<sub>2</sub>, (n=100 obr/min, t=1800 s)

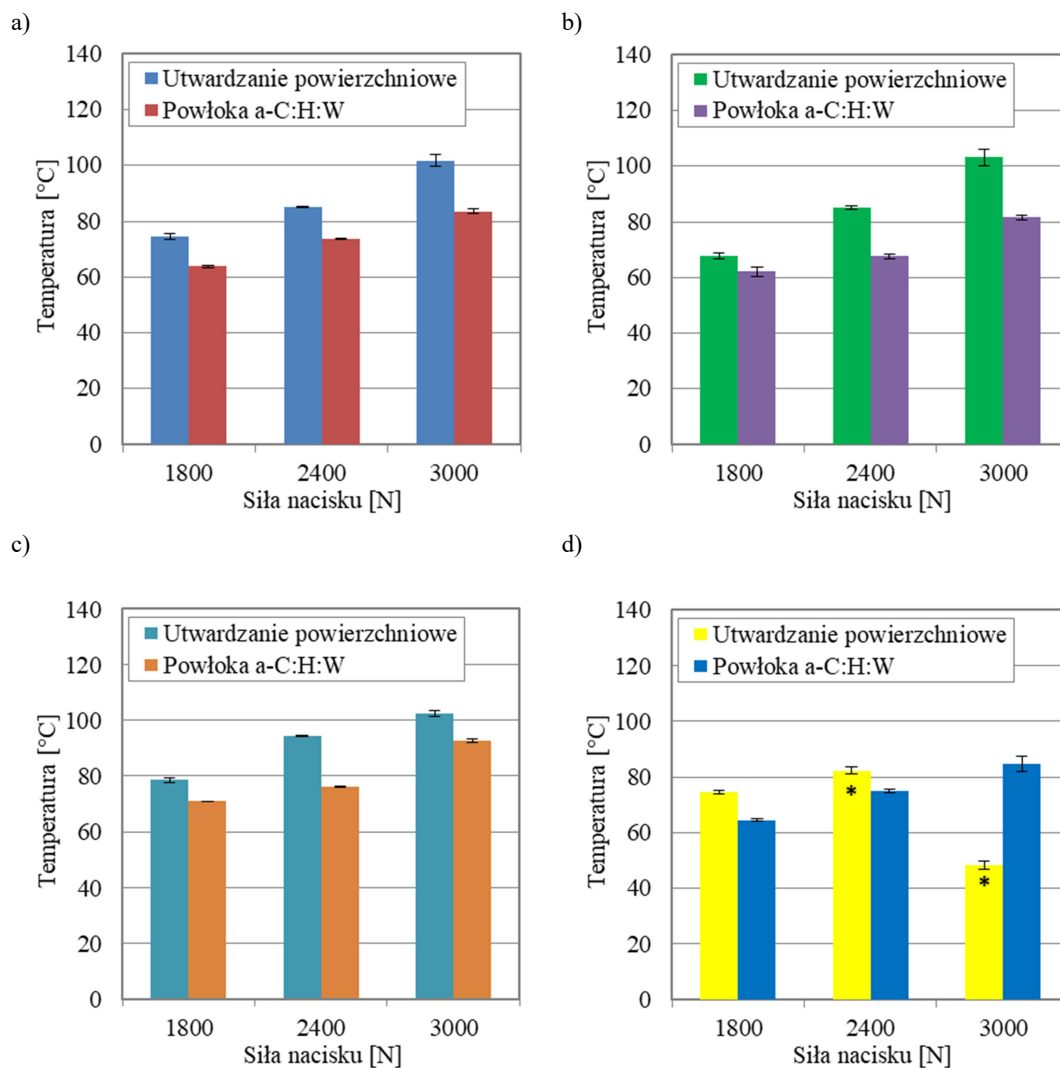
Nieco mniejszy spadek wartości siły tarcia w parach ciernych z płytkami z powłoką a-C:H:W względem oleju nowego 5W40 osiągnięto przy smarowaniu

skojarzenia ciernego olejem zużyтым 5W40 (rys. 5.20b). Spadek wartości wyniósł 22,8%, 17,9% i 31% odpowiednio dla nacisków 1800, 2400 i 3000 N. Wraz ze wzrostem siły obciążającej węzeł tarcia maleje różnica pomiędzy siłą tarcia zmierzoną w trakcie badań węzłów z płytkami utwardzanymi powierzchniowo oraz płytkami pokrytymi powłoką węglową w parach ciernych pracujących z olejem biodegradowalnym 10W40 (rys. 5.20c).

Największa różnica względem przeciwpróbek bez powłoki występuje przy sile nacisku 1800 N – 28,5%, 17,9% - przy 2400 N i 13,5% - przy 3000 N. W parach ciernych smarowanych olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu przy sile nacisku równej 1800 N zarejestrowano spadek siły tarcia rzędu 27,7% względem par z płytkami bez powłoki a-C:H:W (rys. 5.20d). Wartości siły tarcia w parach ciernych z płytkami utwardzanymi powierzchniowo smarowanych olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub> przy sile nacisku 2400 i 3000 N nie zostały uwzględnione w analizie wyników badań. Biegi badawcze tych par każdorazowo kończyły się przedwcześnie zatarciem pary cierniej. Momentowi zatarcia towarzyszyły skokowe wzrosty wartości siły tarcia do poziomu przekraczającego zakres pomiarowy czujnika siły.

Temperatury zarejestrowane podczas badań par ciernych z płytkami z powłoką a-C:H:W są niższe niż podczas badań par z płytkami utwardzanymi powierzchniowo (rys. 5.21). Zjawisko to występuje dla olejów 5W40 (nowy i zużyty) i 10W40 przy wszystkich badanych siłach nacisku. Różnice w temperaturach pomiędzy dwoma rodzajami płytek w parze smarowanej olejem nowym 5W40 wynoszą od 10,6°C przy sile nacisku 1800 N, do 18,2°C przy maksymalnej sile nacisku 3000 N (rys. 5.21a).

Przy naciskach 2400 i 3000 N w parze cierniej pracującej z olejem zużyтым 5W40 różnice są jeszcze bardziej widoczne i wynoszą odpowiednio 17,6 i 21,7°C (rys. 5.21b). Podczas smarowania obszaru tarcia olejem biodegradowalnym 10W40 największa różnica pomiędzy parami z płytkami utwardzanymi powierzchniowo i parami z powłoką a-C:H:W wystąpiła przy sile nacisku 2400 N – 18,2°C (rys. 5.21c). Spadek poziomu temperatur w obszarze tarcia zarejestrowano również w parach ciernych z płytkami z powłoką a-C:H:W smarowanych olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu (rys. 5.21d). Przy sile nacisku 1800 N różnica temperatur pomiędzy parami z płytkami utwardzanymi powierzchniowo, a parami z płytkami z powłoką wyniosła 10,1°C.



Rysunek 5.21. Temperatura w obszarze tarcia w styku liniowym w funkcji siły nacisku i kompozycji pary ciernej przy smarowaniu olejami: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS<sub>2</sub>, (n=100 obr/min, t=1800 s)  
\* - wartość w momencie przerwania próby

Skojarzenia cierne z płytkami utwardzonymi powierzchniowo pracujące pod naciskiem 2400 N w momencie zakończenia próby po upływie 615-650 s (zatarcie) osiągnęły temperatury o 7,1°C wyższe niż pary z płytkami z powłoką a-C:H:W pod koniec biegu badawczego (1800 s). Świadczy to o intensywnym nagrzewaniu elementów pary ciernej towarzyszącym procesowi zacierania. Z kolei temperatury rzędu 48°C w parach z płytkami utwardzonymi powierzchniowo przy sile nacisku 3000 N wynikają z zatarcia węzła ciernego na samym początku prób zużycia (120-165 s).

Wyniki pomiarów parametrów tarcia w styku liniowym wykazały obniżenie wartości siły tarcia oraz spadek temperatur w parach ciernych z płytkami z powłoką a-C:H:W w stosunku do par ciernych z płytkami bez powłoki. Znaczącej poprawie

uległa żywotność węzłów ciernych smarowanych olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu.

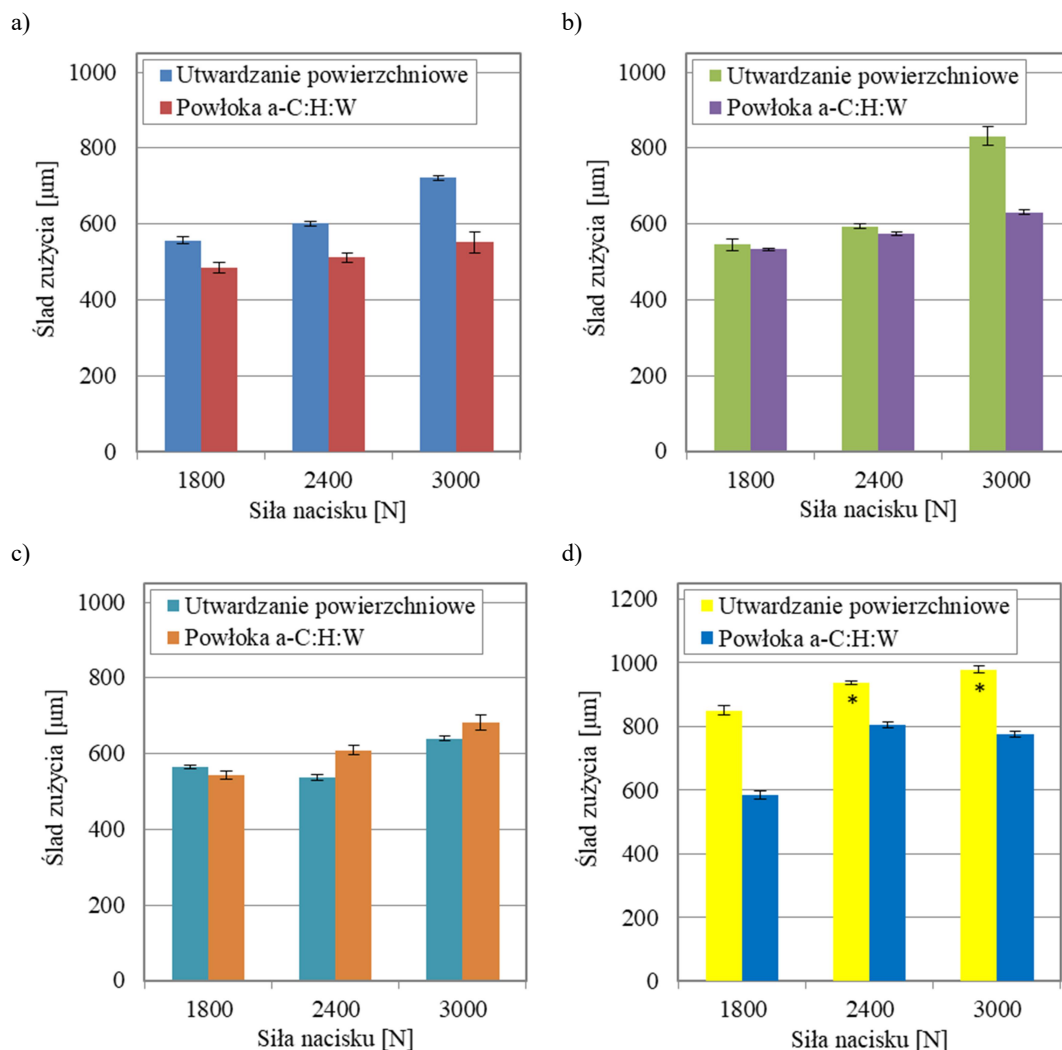
### 5.2.2. Ocena stanu warstwy powierzchniowej elementów pary ciernej

Po zakończeniu prób zużycia w styku liniowym warstwy powierzchniowe płytek zaworowych zostały poddane oględzinom pod mikroskopem. Badania mikroskopowe miały na celu określenie szerokości śladów wytarcia na powierzchni płytek zaworowych w zależności od siły nacisku i oleju smarującego obszar tarcia (rys. 5.22, tabela 5.9), opisu charakterystycznych śladów współpracy elementów pary ciernej i stopnia zniszczenia warstwy wierzchniej i powłoki (rys. 5.23-5.26).

Tabela 5.9. Szerokość śladu zużycia na płytkach zaworowych z prób zużycia w styku liniowym [ $\mu\text{m}$ ]

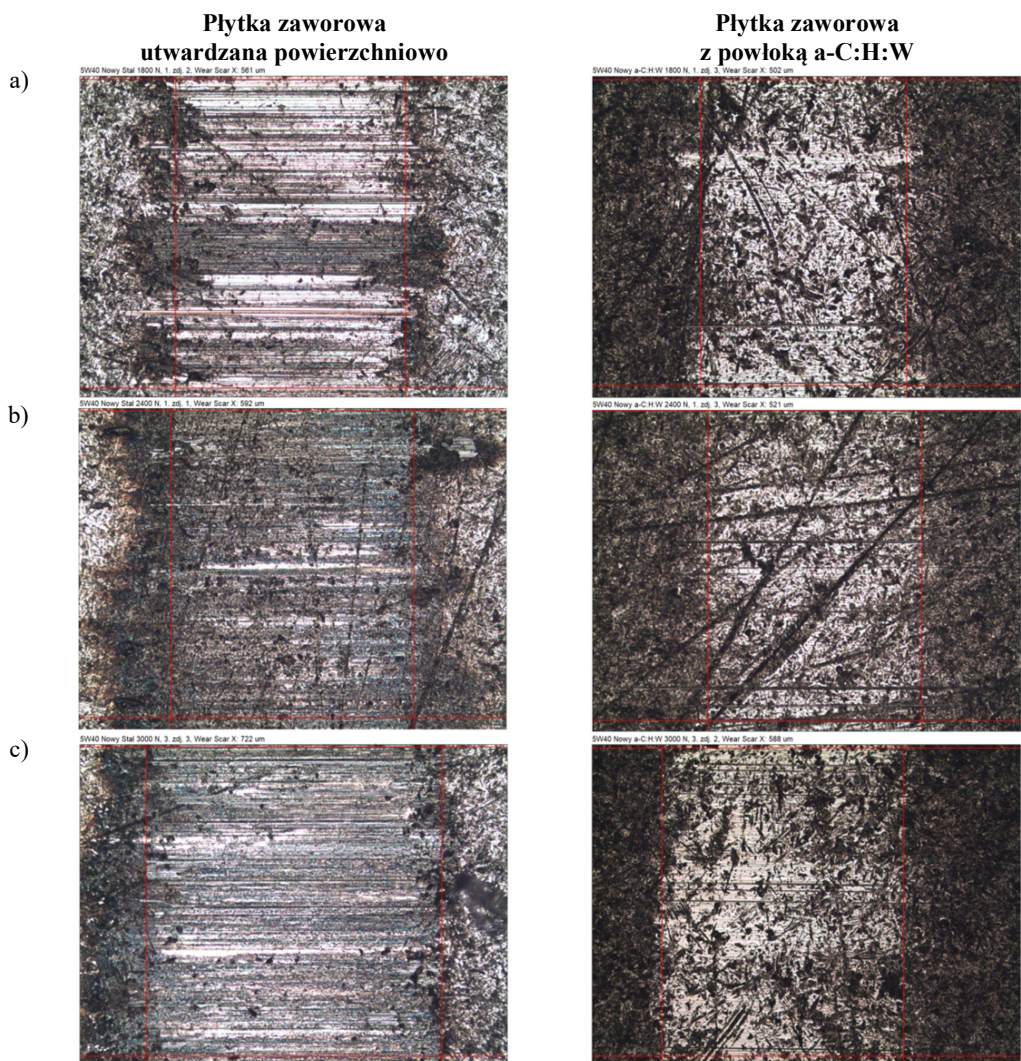
Siła nacisku [N]	Płytki zaworowa utwardzana powierzchniowo				Płytki zaworowa z powłoką a-C:H:W			
	Rodzaj oleju							
	5W40 Nowy	5W40 Zużyty	10W40 Bio	PAO8 + MoS <sub>2</sub>	5W40 Nowy	5W40 Zużyty	10W40 Bio	PAO8 + MoS <sub>2</sub>
1800	557,0	545,0	564,7	850,5	484,8	532,7	543,0	585,0
2400	600,7	593,8	537,8	936,5	511,5	574,3	608,8	804,2
3000	721,2	830,3	639,8	978,8	551,2	630,8	682,3	775,7

Zastosowanie powłoki a-C:H:W na powierzchni płytek pracujących w parach ciernych w styku liniowym w obecności oleju nowego 5W40 powoduje zmniejszenie szerokości śladu zużycia względem par z płytkami bez powłoki (rys. 5.22a). Różnice pomiędzy zmierzonymi wartościami rosną wraz ze wzrostem siły nacisku w obszarze tarcia i wynoszą od 13% przy naciskach 1800 N, poprzez 14,8% przy naciskach średnich 2400 N, aż do 23,6% przy maksymalnej wartości siły obciążającej węzeł tarcia (3000 N). Natomiast różnice w zużyciu płytek utwardzanych powierzchniowo i z powłoką węglową smarowanych olejem użytym 5W40 w zakresie nacisków 1800 – 2400 N są niewielkie i wynoszą 2,3 oraz 3,3% (rys. 5.22b). Istotne różnice w wielkości śladów zużycia regulatorów luzu zaworowego wystąpiły przy nacisku maksymalnym. Szerokość śladu zużycia płytek pokrytych powłoką z węglem amorficznym jest o 24% niższa w porównaniu do płytek bez powłoki. W przypadku badań przeprowadzonych w obecności oleju biodegradowalnego 10W40 zmniejszenie szerokości śladu zużycia nastąpiło tylko w przypadku najniższej siły nacisku – spadek o 3,8% względem płytek utwardzanych powierzchniowo bez powłoki (rys. 5.22c).



Rysunek 5.22. Szerokość śladu zużycia płytek w funkcji siły nacisku i kompozycji pary cieiernej przy smarowaniu olejami: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS<sub>2</sub>, (n=100 obr/min, t=1800 s), \* - wartość w momencie przerwania próby

Podczas pracy z siłami nacisku 2400 i 3000 N zanotowano wzrost kolejno o 13,2 i 6,6% dla regulatorów z powłoką a-C:H:W. Zwiększenie siły nacisku w węzle tarcia z płytkami regulacyjnymi bez powłoki z 1800 na 2400 N spowodowało zmniejszenie śladu zużycia o 4,8%. W parach ciernych smarowanych olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu podczas pracy z naciskiem 1800 N zaobserwowano spadek wielkości śladu zużycia na płytkach regulacyjnych pokrytych powłoką węglową o 31,2% w porównaniu do płytek utwardzanych powierzchniowo (rys. 5.22d). Porównując wartości w zakresie nacisków 2400-3000 N zarejestrowano spadek o 14,2% i 20,8% względem płytek utwardzanych powierzchniowo, które uległy zatarciu przed upływem założonego czasu badania.

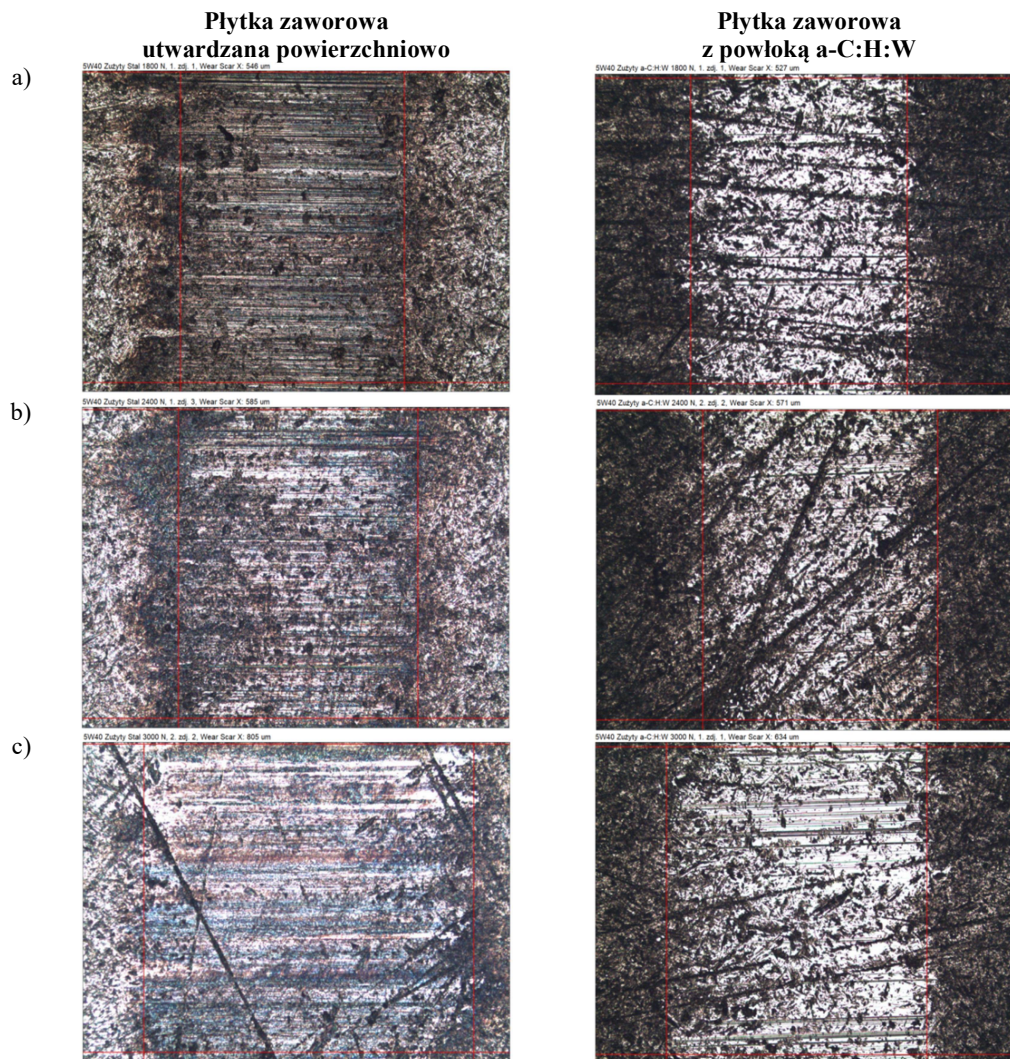


Rysunek 5.23. Zdjęcia śladów zużycia płytek zaworowych po eksploatacji w styku liniowym smarowanych olejem nowym 5W40 przy sile nacisku: a) 1800 N, b) 2400 N, c) 3000 N

Zdjęcia powierzchni płytek zaworowych po próbach zużycia w styku liniowym smarowanych olejem nowym 5W40 przedstawia rys. 5.23. Płytki zaworowe utwardzane powierzchniowo noszą wyraźne ślady zużycia. Po próbach przy nacisku 1800 N widoczne są liczne poprzeczne rysy. Wraz ze zwiększeniem siły nacisku do 2400 N szerokość śladu zużycia nieznacznie zwiększyła się, ilość poprzecznych rys zmniejszyła się, istnieją również obszary o zachowanej strukturze warstwy powierzchniowej sprzed próby zużycia. Przy nacisku 3000 N intensywność zużycia wzrosła. Zwiększyła się szerokość śladu zużycia, powierzchnia tarcia posiada liczne poprzeczne rysy. Płytki zaworowe z powłoką a-C:H:W nie noszą znaczących śladów zużycia warstwy powierzchniowej. Widoczny jest wyraźny ślad współpracy powłoki a-C:H:W w miejscu styku z próbką pierścieniową, tym szerszy im wyższa była siła obciążająca węzeł tarcia.

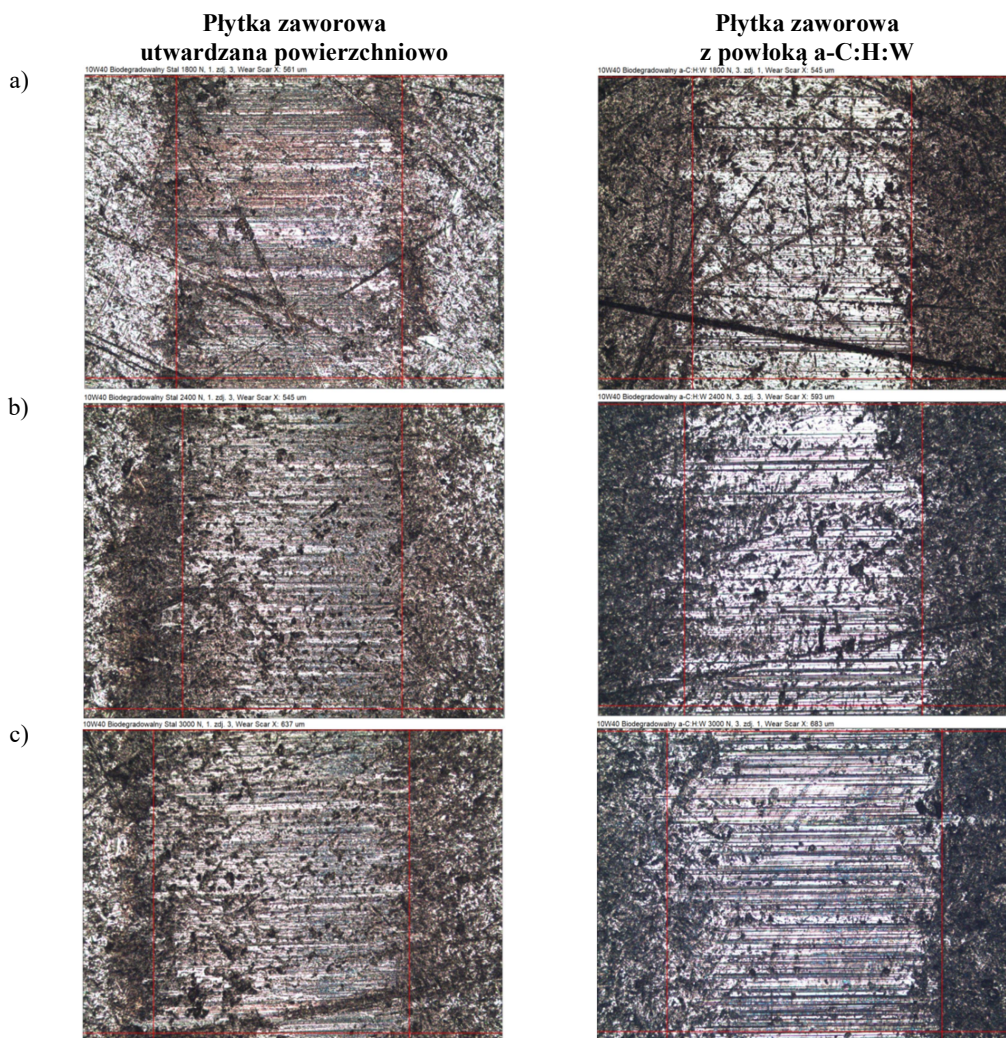


Na powierzchni płytek dostrzec można poprzeczne rysy świadczące o bardziej intensywnym zużyciu w tych obszarach kontaktu powierzchni próbki pierścieniowej i płytki zaworowej w trakcie pracy. Zachowana została oryginalna struktura warstwy powierzchniowej powłoki wytworzona w technologicznym procesie jej nanoszenia.



Rysunek 5.24. Zdjęcia śladów zużycia płytek zaworowych po eksploatacji w styku liniowym z olejem zużytym 5W40 przy sile nacisku: a) 1800 N, b) 2400 N, c) 3000 N

Zdjęcia płytek zaworowych pracujących w próbach zużycia w obecności oleju zużytego 5W40 przedstawia rys. 5.24. Intensywność zużycia powierzchni płytek bez powłoki w porównaniu do odpowiadających im płytek pracujących z olejem nowym 5W40 jest niższa. W całym zakresie sił nacisku charakter zużycia jest niemal identyczny, wraz ze wzrostem siły nacisku zwiększa się szerokość śladu zużycia. Na powierzchni próbek widoczne są liczne poprzeczne rysy, częściowo zachowana została początkowa struktura warstwy powierzchniowej w postaci porów i rys.



Rysunek 5.25. Zdjęcia śladów zużycia płytek zaworowych po eksploatacji w styku liniowym z olejem biodegradowalnym 10W40 przy sile nacisku: a) 1800 N, b) 2400 N, c) 3000 N

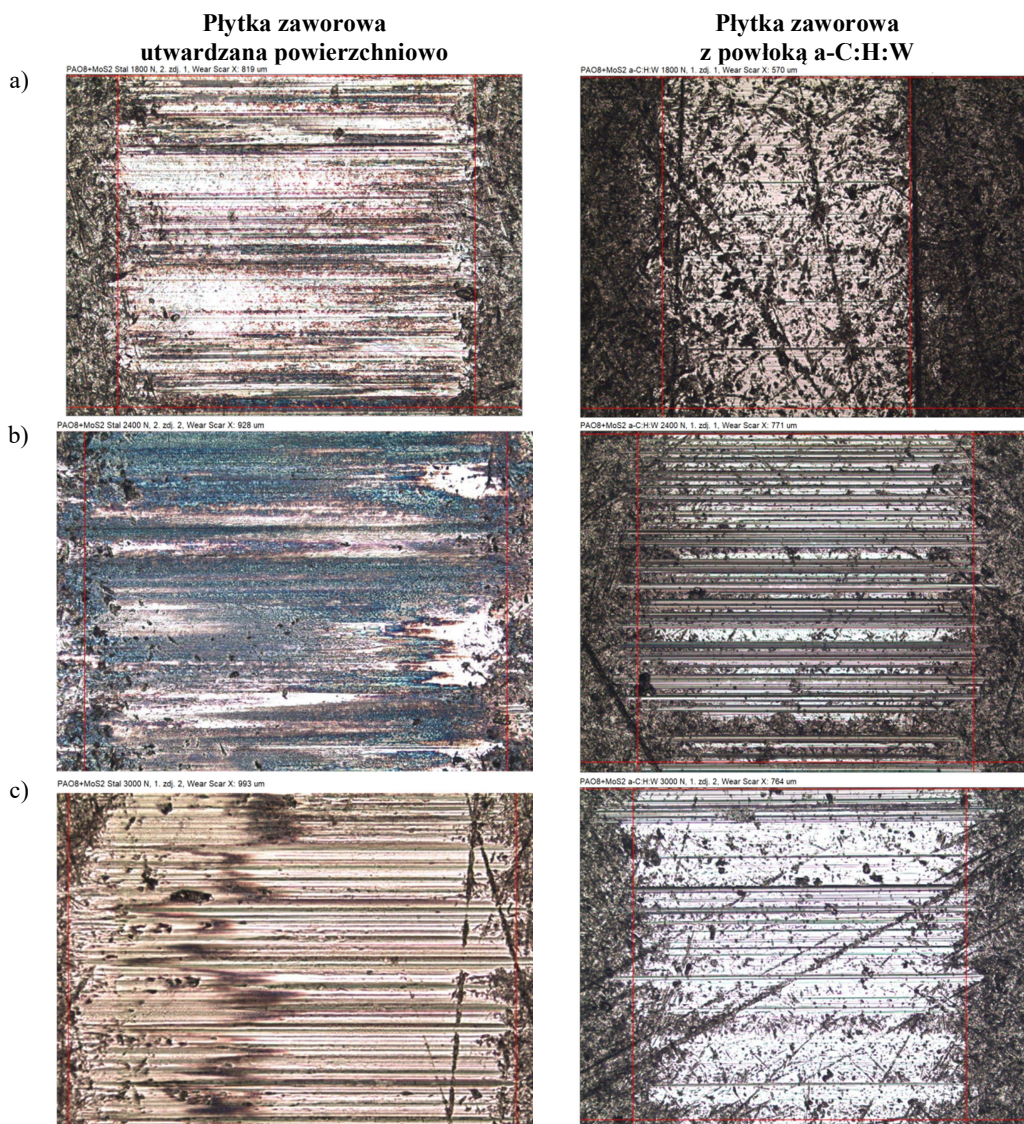
Płytką pracującą pod maksymalnym naciskiem 3000 N posiada oprócz rys poprzeczne wytarcia materiału widoczne na zdjęciu jako jasne linie. Regulatory z powłoką a-C:H:W smarowane olejem zużytym 5W40 noszą minimalne ślady zużycia warstwy powierzchniowej. Na zdjęciach widoczne są pojedyncze poprzeczne rysy, których ilość zwiększa się wraz ze wzrostem siły nacisku. Podobnie jak w przypadku płytek współpracujących z olejem nowym 5W40, w całym zakresie badanych sił nacisku zachowana została oryginalna struktura warstwy powierzchniowej powstała w procesie jej nanoszenia.

Płytki utwardzane powierzchniowo smarowane olejem biodegradowalnym 10W40 zużywały się w sposób podobny do wcześniej przedstawionych, a ślady współpracy mają identyczny charakter w badanym zakresie nacisków w obszarze tarcia

(rys. 5.25). Na powierzchni śladu zużycia widoczne są niezbyt głębokie rysy i wytarcia materiału. Zauważalna jest zachowana część warstwy powierzchniowej sprzed eksploatacji. W przypadku płytek z powłoką a-C:H:W zmniejszenie śladu zużycia względem płytek bez powłoki widoczne jest przy nacisku minimalnym 1800 N. W porównaniu do płytek bez powłoki a-C:H:W szerokość śladu zużycia przy naciskach 2400 – 3000 N jest większa. Powłoka a-C:H:W ogranicza zużycie powierzchni w zakresie niskich i średnich wartości siły nacisku, przy najwyższej badanej wartości siły nacisku pojawiają się liczne głębokie rysy.

Powierzchnie tarcia płytek bez powłoki smarowane podczas prób kompozycją oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> wykazują wyraźne ślady intensywnego zużycia (rys. 5.26). Szerokość śladu zużycia płytki pracującej przy sile nacisku 1800 N wyniosła 810 μm – jest to zużycie na poziomie płytek utwardzanych powierzchniowo pracujących z olejem zużytym 5W40 przy sile nacisku równej 3000 N. Na powierzchni płytki widoczne są liczne rysy. Zwiększenie siły nacisku do 2400 N spowodowało zatarcie badanej pary cierniej po upływie 650 s. Na powierzchni płytki nastąpiło zwiększenie szerokości śladu zużycia do 928 μm, zaobserwowano również występowanie śladów oddziaływania wysokiej temperatury w obszarze tarcia. Płytką zaworowa bez powłoki pracująca pod siłą nacisku 3000 N do momentu zatarcia przez 120 s (z zakładanych 1800 s biegu badawczego) nosi największe ślady zużycia spośród badanych par ciernych – 993 μm. Powierzchnia współpracy posiada głębokie poprzeczne rysy, a pionowy, ciemny ślad świadczy prawdopodobnie o działaniu wysokiej temperatury w obszarze tarcia. Płytki zaworowe z powłoką a-C:H:W smarowane olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu generowały korzystniejsze warunki tarcia w porównaniu do płytek utwardzanych powierzchniowo. Ślad zużycia płytki przy nacisku 1800 N ma niemal identyczny charakter jak ten uzyskany dla płytek z powłoką w warunkach smarowania olejami klasy 5W40 przy takiej samej sile nacisku. Struktura warstwy powierzchniowej pozostała niemal nienaruszona. Praca pod naciskiem 2400 N spowodowała zwiększenie śladu zużycia do 771 μm. Na powierzchni współpracy z próbką pierścieniową widać głębokie rysy, jednak ciągle widoczne są obszary ze strukturą warstwy powierzchniowej płytki sprzed eksploatacji. Przeciwpróbka pracująca z najwyższą badaną siłą nacisku (3000 N) nie nosi znaczących śladów zużycia. W przeciwieństwie do płytki bez powłoki para cierna z powłoką a-C:H:W przepracowała bez zatarcia pełen bieg badawczy (1800 s). Na powierzchni płytki występują sporadycznie głębokie rysy. Ślad współpracy z pierścieniem jest wyraźny

i widoczne są jeszcze ślady obróbki kształtującej płytkę zaworową obecne na powierzchni tarcia przed próbą zużycia.



Rysunek 5.26. Zdjęcia śladów zużycia płytek zaworowych po eksploatacji w styku liniowym z olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub> przy sile nacisku: a) 1800 N, b) 2400 N, c) 3000 N

Na zdjęciach mikroskopowych z prób zużycia w styku liniowym widoczny jest odmienny charakter zużycia warstwy powierzchniowej płytek zaworowych z powłoką a-C:H:W. Płytki zaworowe pokryte powłoką węglową po eksploatacji w styku liniowym w większości badanych przypadków nie wykazują znaczącego zużycia ściernego. Ślady współpracy wskazują na postępujący proces wycierania powłoki w miejscu styku liniowego z próbką pierścieniową z jednoczesnym ograniczeniem zużycia ściernego. Zmiana charakteru współpracy na korzystniejszy nastąpiła dla nowego i zużytego oleju 5W40 w całym zakresie badanych nacisków. Redukcję śladu

zużycia płytki z powłoką a-C:H:W smarowanej olejem biodegradowalnym 10W40 zarejestrowano dla siły nacisku 1800 N. Przy wyższych wartościach siły nacisku ślad zużycia zwiększył się. W przypadku par ciernych pracujących w obecności oleju bazowego PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu dla płytek z powłoką widoczna jest poprawa warunków tarcia przy najniższym nacisku 1800 N. W zakresie nacisków średnich (2400 N) szerokość śladu zużycia jest zredukowana, aczkolwiek na powierzchni występują głębokie rysy. Ewidentną poprawę warunków tarcia po zastosowaniu powłoki węglowej widać przy naciskach 3000 N, w których poprzeczne rysy występują sporadycznie, ślad zużycia jest mniejszy i ciągle widoczna jest oryginalna struktura warstwy powierzchniowej płytki. Płytki zaworowe utwardzane powierzchniowo pracujące w obecności oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> pod naciskiem 2400 i 3000 N uległy zatarciu, podczas gdy pary z próbkami z powłoką a-C:H:W przepracowały cały cykl badawczy.

### **5.2.3. Zmiany chropowatości warstwy powierzchniowej elementów pary cierniej**

Po współpracy par ciernych w styku liniowym przeprowadzono pomiary chropowatości powierzchni próbek pierścieniowych i płytek zaworowych (parametry chropowatości Ra, Rz, Rq, RSm) i porównano je z wartościami początkowymi (tabela 5.10).

Po próbach zużycia w styku liniowym w warunkach smarowania olejem nowym 5W40 przy naciskach 3000 N zarejestrowano wzrost wszystkich badanych parametrów chropowatości pierścienia ulepszanego cieplnie pracującego z płytką zaworową utwardzaną powierzchniowo (tabela 5.10). Wzrost wartości względem nowej próbki pierścieniowej wyniósł od 19,1% dla parametru Ra, poprzez 40,5 i 53,2% dla parametrów Rq i Rz, kończąc na zmianie rzędu 161,8% w przypadku chropowatości RSm. Wartości parametrów Ra, Rq i RSm współpracującej z tym pierścieniem płytki zaworowej utwardzanej powierzchniowo zmniejszyły się o 27% (Ra) i 18,9% (Rq). Nieznacznie zmniejszył się parametr chropowatości RSm – o 3,5%, natomiast o 26,3% wzrósł parametr Rz. Para cierna z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W po próbach zużycia wykazuje zmniejszenie wartości badanych parametrów chropowatości dla obu elementów pary cierniej, za wyjątkiem parametru RSm. Parametry chropowatości Ra, Rz i Rq pierścienia ulepszanego cieplnie spadły o 36,8-48% względem nowego elementu, natomiast znacząco wzrósł parametr RSm - o 257,6%. Chropowatość powierzchni płytki regulacyjnej z powłoką a-C:H:W opisana parametrami Ra, Rz i Rq

zmieniła się w wąskim zakresie 19,4-19,6%. Nieznacznie wzrosła wartość parametru RSm – 4,4% względem nieeksploatowanej płytki z powłoką.

Tabela 5.10. Parametry chropowatości powierzchni elementów par ciernych po badaniach w styku liniowym (siła nacisku 3000 N), \* - próba zakończona zatarciem pary ciernej

Kompozycja pary ciernej		Pierścień ulepszany cieplnie – płytką utwardzaną powierzchniowo				Pierścień ulepszany cieplnie – płytką z powłoką a-C:H:W			
Element pary ciernej		Płytką		Pierścień		Płytką		Pierścień	
Olej	Parametr chropowa -tości	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]
5W40 Nowy	Ra	0,21	-27,0	0,24	19,1	0,25	-19,6	0,13	-36,8
	Rz	2,26	26,3	2,62	53,2	2,10	-19,5	0,89	-48,0
	Rq	0,28	-18,9	0,37	40,5	0,33	-19,4	0,16	-40,2
	RSm	43,60	-3,5	86,40	161,8	50,30	4,4	118	257,6
5W40 Zużyty	Ra	0,29	1,8	0,49	140,7	0,26	-16,4	0,16	-21,6
	Rz	2,14	19,6	3,92	129,2	2,24	-14,2	1,42	-17,0
	Rq	0,37	5,7	0,67	153,8	0,35	-14,7	0,21	-19,3
	RSm	93,60	107,1	69,50	110,6	58,50	21,4	128	287,9
10W40 Bio	Ra	0,26	-6,0	0,21	4,4	0,20	-36,7	0,23	13,7
	Rz	1,73	-3,4	2,65	55,0	1,64	-37,2	2,25	31,6
	Rq	0,34	-2,3	0,33	23,1	0,26	-35,5	0,32	21,2
	RSm	124	174,3	147	345,5	50,50	4,8	190	475,8
PAO8 + MoS <sub>2</sub>	Ra	0,31*	11,4	0,77*	277,5	0,26	-16,4	0,82	299,5
	Rz	2,04*	14,0	5,84*	241,5	2,86	9,6	6,37	272,5
	Rq	0,38*	8,6	1,04*	293,9	0,37	-10,5	1,07	305,3
	RSm	143*	216,4	79,40*	140,6	45,20	-6,2	104	215,2

Chropowatość powierzchni płytki utwardzanej powierzchniowo i próbki pierścieniowej po eksploatacji przy naciskach 3000 N i smarowaniu olejem użytym 5W40 zwiększyła się (tabela 5.10). Zmiany badanych parametrów chropowatości względem nieużywanej powierzchni próbki pierścieniowej przekroczyły 110%, osiągając w skrajnym przypadku 153,8% - chropowatość Rq. Chropowatość płytki regulacyjnej wzrosła w mniejszym stopniu w porównaniu do powierzchni pierścienia, zanotowano wzrost parametru Rz o 19,6%, a parametru Rq o 5,7%. Parametr Ra zwiększył się nieznacznie (1,8%), natomiast wzrost chropowatości RSm jest niemal identyczny jak dla próbki pierścieniowej (107,1%). Odmienna tendencja występuje

w przypadku skojarzenia ciernego z płytką z powłoką a-C:H:W, w którym wartość parametrów chropowatości Ra, Rz i Rq próbki pierścieniowej spadła w zakresie od 17 do 21,6%. Jednocześnie istotnie wzrósł parametr chropowatości RSm - o 287,9% względem powierzchni nowego pierścienia. Zmniejszenie wartości parametrów chropowatości Ra, Rz i Rq powierzchni płytki z powłoką węglową wynosi od 14,2 do 16,4%. O 21,4% wzrosła wartość parametru RSm. Zmiany w wartościach chropowatości elementów pary cierniej z płytką z powłoką mają identyczny charakter jak w przypadku analogicznych elementów pary cierniej smarowanej olejem nowym 5W40.

Badania chropowatości powierzchni par ciernych smarowanych olejem biodegradowalnym 10W40 po próbach zużycia przy nacisku 3000 N wykazały istotne zmiany w strukturze warstwy powierzchniowej pierścieni ulepszanych cieplnie pracujących zarówno z płytką zaworową utwardzaną powierzchniowo jak i z płytką z powłoką a-C:H:W (tabela 5.10). Spośród badanych parametrów chropowatości pierścienia pracującego z płytką utwardzaną powierzchniowo najistotniej zmienił się parametr RSm, który wzrósł o 345,5% w porównaniu do nowego pierścienia ulepszanego cieplnie. Najmniejsza różnica wystąpiła w przypadku parametru Ra (wzrost o 4,4%). Większe zmiany dotyczą parametrów Rq i Rz – wzrost wartości odpowiednio o 23,1 i 55% względem chropowatości przed próbami zużycia. Parametry Ra, Rz i Rq powierzchni płytki zaworowej utwardzanej powierzchniowo współpracującej z pierścieniem zmniejszyły się w nieznacznym stopniu (od 2,3 do 6%). Parametr RSm wzrósł o 174,3%, co stanowi niemal trzykrotny wzrost względem nowej płytki zaworowej. Zmiany chropowatości pierścienia współpracującego z płytką z powłoką węglową mają podobny charakter zmian jak w przypadku współpracy z płytką utwardzaną powierzchniowo. Wszystkie wartości badanych parametrów zwiększyły się. Zmiany procentowe Ra, Rz i Rq wynoszą od 13,7% do 31,6%, a chropowatość wyrażona parametrem RSm wzrosła o 475,8% względem nowego pierścienia. Pomiary chropowatości płytki zaworowej z powłoką węglową wykazały zmniejszenie parametrów chropowatości Ra, Rz i Rq (35,5-37,2%) oraz nieznaczny wzrost parametru RSm (4,8%) względem nowych płytek z powłoką.

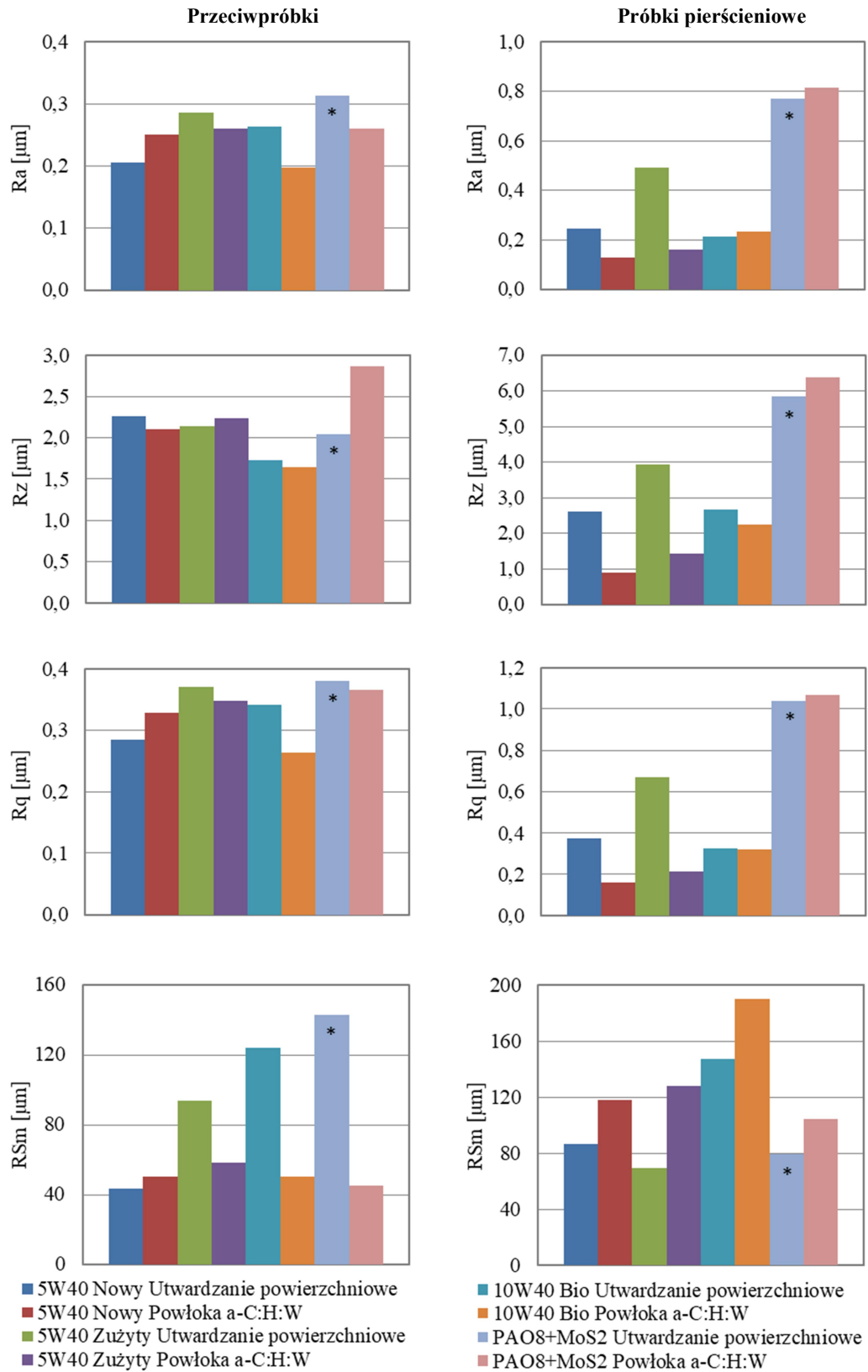
Skojarzenie cierne z płytkami zaworowymi utwardzonymi powierzchniowo smarowane olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu pod naciskiem 3000 N uległo zatarciu w początkowej fazie prób zużycia. Powierzchnia pierścienia ulepszanego cieplnie wykazała niemal czterokrotny wzrost wartości

parametrów chropowości Ra, Rz i Rq oraz wzrost parametru RSm rzędu 140,6% względem pierścienia przed testami (tabela 5.10). Powierzchnia płytki nie wykazuje tak intensywnych zmian w strukturze powierzchni, parametry Ra i Rz zwiększyły się o 11,4 i 14%, a Rq o 8,6%. Największą zmianę odnotowano dla wartości parametru RSm – wzrost o 216,4% względem nowej płytki zaworowej. Charakter i intensywność zmian chropowości powierzchni pierścienia pracującego z płytką z powłoką a-C:H:W jest zbliżona do pierścienia pracującego z płytkami utwardzanymi powierzchniowo, z tą różnicą, że skojarzenie cierne z płytkami z powłoką przepracowało pełen cykl badawczy. Wszystkie parametry chropowości pierścienia wzrosły w zakresie od 215,2 do 305,3%. Parametry Ra, Rq i RSm współpracującej płytki zaworowej z powłoką węglową zmniejszyły się odpowiednio o 16,4, 10,5 i 6,2%, jedyny wzrost zarejestrowano w przypadku parametru chropowości Rz – 9,6%.

Pomiary chropowości powierzchni elementów par ciernych po próbach zużycia w styku liniowym wykazały istotny wpływ warstwy powierzchniowej i smarowania na kształtowanie struktury geometrycznej powierzchni (rys. 5.27). Parametry chropowości Ra, Rq i RSm płytki zaworowej z powłoką a-C:H:W współpracującej z pierścieniem ulepszanym cieplnie w obecności oleju nowego 5W40 w próbach zużycia wzrosły w zakresie od 15,4 do 22% względem wartości zmierzonych dla płytki utwardzanej powierzchniowo pracującej w tych próbach. Wartość parametru Rz zmniejszyła się o 7,1% względem płytki bez powłoki węglowej. Pomiary chropowości próbki pierścieniowej po próbach z udziałem oleju nowego 5W40 wykazały zmniejszenie wartości parametrów Ra, Rz i Rq pierścienia po próbach zużycia z płytką z powłoką a-C:H:W względem pary ciernej z płytką utwardzaną powierzchniowo. Chropowość Ra spadła o 46,9%, Rz o 66,1%, a Rq o 57,4%. Parametr RSm powierzchni pierścienia wzrósł o 36,6% względem próbki pierścieniowej pracującej z płytką bez powłoki węglowej.

Wartości parametrów chropowości Ra, Rq oraz RSm płytki zaworowej z powłoką a-C:H:W w parze smarowanej olejem zużytym 5W40 są niższe w porównaniu do wartości zmierzonych dla płytki utwardzanej powierzchniowo po próbach zużycia w styku liniowym (rys. 5.27). Zmiany procentowe zawierają się w zakresie 5,9-37,5%. Parametr Rz wzrósł o 4,7% w porównaniu do płytki utwardzanej powierzchniowo po próbach zużycia. Parametry chropowości powierzchni Ra, Rz i Rq pierścienia pracującego w skojarzeniu ciernym z płytką z powłoką w warunkach





Rysunek 5.27. Parametry chropowatości Ra, Rz, Rq i Rsm płytek utwardzanych powierzchniowo i płytek z powłoką a-C:H:W oraz próbek pierścieniowych ulepszonej cieplnie po próbach zużycia w styku liniowym, siła nacisku 3000 N, \* - próba zakończona zatarciem pary czarnej

smarowania użytym olejem 5W40 są znacząco niższe w porównaniu do wartości zmierzonych dla pierścienia pracującego z płytką utwardzaną powierzchniowo. Parametr chropowatości Ra zmniejszył się o 67,4%, Rz o 63,8%, a Rq o 68,2%. Zarejestrowano wzrost parametru RSm o 84,2% względem pierścienia pracującego w próbach zużycia z płytką utwardzaną powierzchniowo.

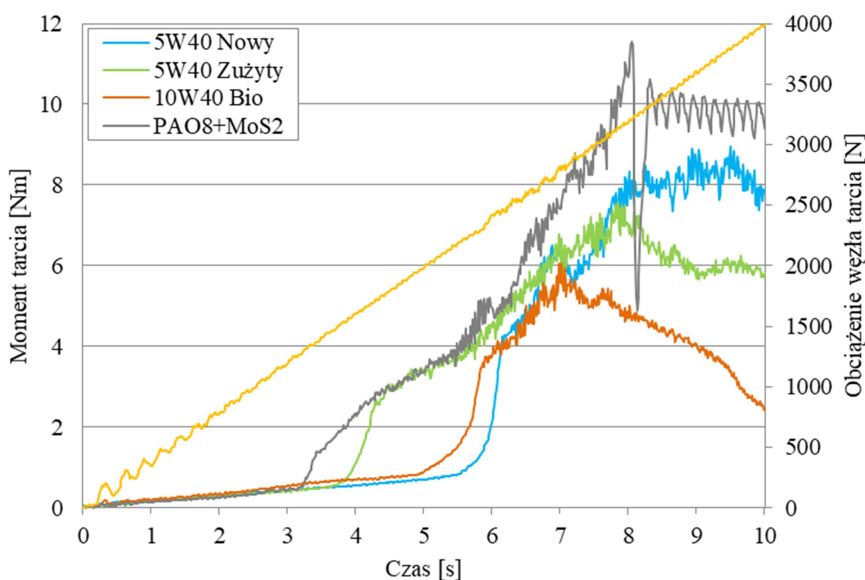
Płytką zaworowa z powłoką a-C:H:W smarowana olejem biodegradowalnym 10W40 po próbach zużycia z pierścieniem ulepszanym cieplnie wykazuje zmniejszenie wartości wszystkich badanych parametrów chropowatości w porównaniu do płytki utwardzanej powierzchniowo (rys. 5.27). Największy spadek wykazał parametr RSm (59,3%), a następnie parametry Ra i Rq (odpowiednio 25,4 i 23,1%). W nieznacznym stopniu zmniejszył się parametr Rz (5,2%) względem płytki utwardzanej powierzchniowo eksploatowanej w próbie zużycia. Chropowatość powierzchni pierścienia współpracującego z płytką z powłoką a-C:H:W zwiększyła się (Ra o 8,9% i RSm o 29,3%) w stosunku do pierścienia pracującego z płytką utwardzaną powierzchniowo podczas smarowania olejem biodegradowalnym 10W40. Chropowatość Rz pierścienia pracującego z płytką z powłoką zmniejszyła się o 15,1%, zaś parametr Rq pozostał niemal na niezmiennym poziomie (spadek o 1,5%) w odniesieniu do pierścienia pracującego z płytką utwardzaną powierzchniowo.

Parametry chropowatości Ra i Rq płytki zaworowej z powłoką a-C:H:W po próbach zużycia w warunkach smarowania olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub> zmniejszyły się w porównaniu do płytki utwardzanej powierzchniowo (rys. 5.27). Spadek wartości parametrów Ra i Rq względem płytki bez powłoki wyniósł odpowiednio 16,9 i 3,9%. Wzrosła natomiast wartość parametru Rz o 40,2%. Znacząco zmniejszyła się również chropowatość RSm płytki z powłoką (68,4%) względem płytki utwardzanej powierzchniowo po próbach zużycia. Wszystkie z badanych parametrów chropowatości powierzchni pierścienia współpracującego z płytką z powłoką przy smarowaniu olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub> zwiększyły się po próbach zużycia w odniesieniu do pierścienia pracującego z płytką utwardzaną powierzchniowo. Wzrost parametrów Ra, Rz i Rq jest nieznacznym i zawiera się w zakresie 2,9-9,1%. Największy przyrost wartości wykazał parametr RSm – 31% względem pierścienia eksploatowanego z płytką bez powłoki. Porównując chropowatość próbek pierścieniowych po współpracy z płytkami utwardzonymi powierzchniowo i z płytkami z powłoką a-C:H:W wartości parametrów Ra, Rz, i Rq po próbach zużycia w obecności oleju bazowego PAO8 z dodatkiem

dwusiarczku molibdenu są najwyższe spośród par ciernych smarowanych badanymi olejami.

### 5.3. Ocena właściwości przeciwzatarciowych środków smarowych

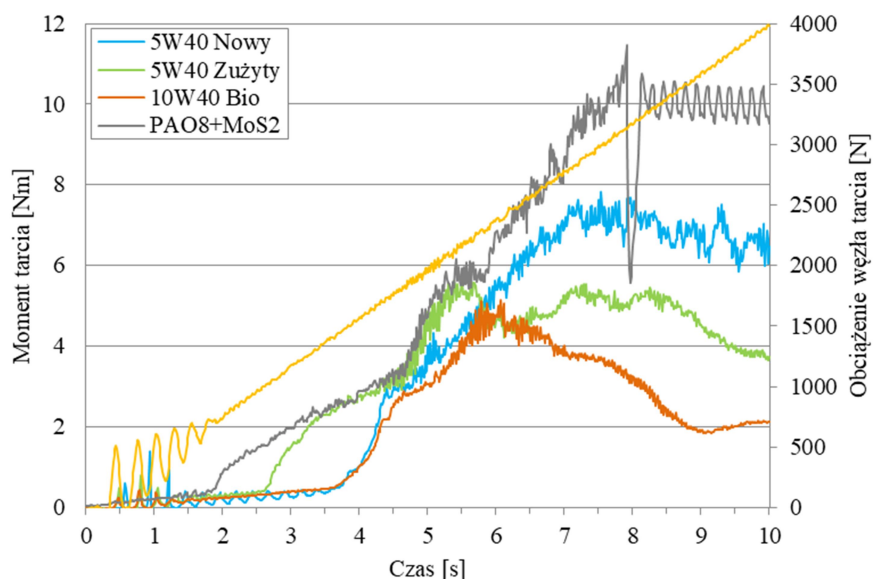
Badania właściwości przeciwzatarciowych zastosowanych do smarowania pary ciernej olejów przeprowadzono z wykorzystaniem aparatu czterokulowego i obejmowały one oleje przed i po próbach zużycia w styku liniowym. Próby przeprowadzono w temperaturze 40 i 100°C, w wyniku których otrzymano przebiegi momentu tarcia w zależności od zmiennego obciążenia węzła tarcia (rys. 5.28-5.29, rys. 5.32-5.33), co umożliwiło wyznaczenie obciążenia zacierającego i granicznego nacisku zatarcia.



Rysunek 5.28. Moment tarcia  $M_t$  przy zmiennym obciążeniu styku czterokulowego dla olejów przed eksploatacją w styku liniowym (temperatura 40°C)

Badania olejów przed próbami zużycia przeprowadzone w temperaturze 40°C wykazały, że najniższe obciążenie zacierające zmierzono w styku czterokulowym smarowanym olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu, następnie smarowanym olejem zużytym 5W40, olejem biodegradowalnym 10W40 i olejem nowym 5W40 (rys. 5.28).

W temperaturze 100°C inicjacja zacierania przy najniższym obciążeniu rozpoczęła się w skojarzeniu smarowanym olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub>, następnie w styku smarowanym olejem zużytym 5W40, olejem nowym 5W40 i olejem biodegradowalnym 10W40, w którym zacieranie rozpoczyna się przy zbliżonych wartościach obciążenia (rys. 5.29).



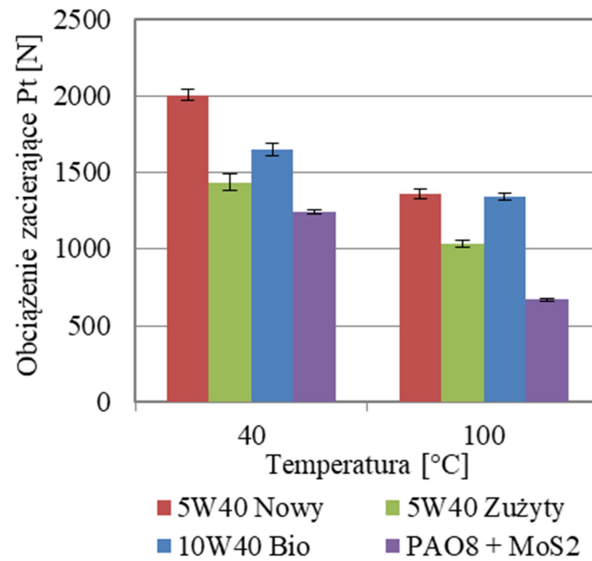
Rysunek 5.29. Moment tarcia  $M_t$  przy zmiennym obciążeniu styku czterokulowego dla olejów przed eksploatacją w styku liniowym (temperatura 100°C)

Zarejestrowane podczas prób na aparacie czterokulowym przebiegi momentu tarcia umożliwiły wyznaczenie wartości granicznego nacisku zatarcia  $p_{oz}$  i obciążenia zacierającego  $P_t$  dla środków smarowych przed eksploatacją w styku liniowym (tabela 5.11).

Tabela 5.11. Właściwości przeciwzatarciowe środków smarowych przed eksploatacją w styku liniowym

Olej smarowy	5W40 nowy		5W40 zużyty		10W40 biodegradowalny		PAO8 + MoS <sub>2</sub>	
	40°C	100°C	40°C	100°C	40°C	100°C	40°C	100°C
Ślad zużycia d [mm]	3,49	3,20	2,53	2,37	1,95	1,82	3,10	3,26
Obciążenie zacierające $P_t$ [N]	2008,8	1360,0	1436,4	1035,2	1650,4	1340,8	1244,4	672,8
Obciążenie zatarcia $P_{oz}$ [N]	3356,0	2836,0	3099,2	2100,0	2663,2	2269,2	3201,3	3016,0
Graniczny nacisk zatarcia $p_{oz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	143,5	144,1	251,1	194,4	363,8	354,9	173,8	147,7

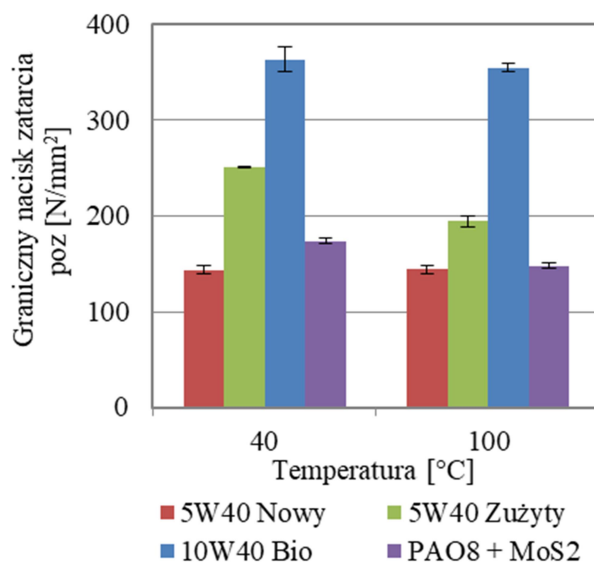
Wyznaczone wartości obciążenia zacierającego  $P_t$  powodujące inicjację zacierania par ciernych w temperaturze 100°C są istotnie niższe w porównaniu do wartości wyznaczonych z prób w temperaturze 40°C (rys. 5.30).



Rysunek 5.30. Obciążenie zacierające  $P_t$  badanych olejów przed eksploatacją w styku liniowym

Z zarejestrowanych danych wynika, że w temperaturze 40°C najwyższą odporność warstwy granicznej posiada olej nowy 5W40 (inicjacja zacierania przy obciążeniu 2008,8 N), następnie olej biodegradowalny 10W40 (1650,4 N) oraz olej zużyty 5W40 (1436,4 N). W temperaturze 40°C najniższe obciążenie zacierające zarejestrowano w styku smarowanym olejem bazowym PAO8 z dodatkiem MoS<sub>2</sub> (1244,4 N) i było ono niższe w stosunku do styku smarowanego olejem nowym 5W40 o 38%. Wartości obciążenia zacierającego  $P_t$  w smarowanej olejem nowym 5W40 i biodegradowalnym 10W40 parze w temperaturze 100°C były porównywalne (1360 i 1340,8 N). W badaniach w temperaturze 100°C najniższe obciążenie zacierające wyznaczono w styku smarowanym kompozycją oleju PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu (672,8 N). Obciążenie zacierające podczas smarowania olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub> jest niższe w stosunku do smarowania olejem nowym 5W40 i biodegradowalnym 10W40 prawie o 50%. Inicjacja zacierania skojarzenia ciernego smarowanego olejem zużytym 5W40 nastąpiła przy obciążeniu 1035,2 N. W porównaniu do wartości wyznaczonych podczas badań w temperaturze 40°C, w temperaturze 100°C nastąpiło istotne zmniejszenie obciążenia zacierającego  $P_t$  dla badanych środków smarowych. Redukcja wartości obciążenia zacierającego oleju nowego 5W40 wyniosła 32,3%, a oleju zużytego 5W40 – 27,9%. Najmniejsza zmiana obciążenia zacierającego wystąpiła dla oleju biodegradowalnego 10W40 – 18,8%, największa zaś dla kompozycji olej PAO8 + MoS<sub>2</sub> i wyniosła 45,9%.

Zarówno w temperaturze 40 jak i 100°C widoczny jest wpływ zużycia oleju silnikowego 5W40 – obciążenie przy którym inicjowany jest proces zacierania jest o 28,5% niższe w temperaturze 40°C i 23,9% w temperaturze 100°C w porównaniu do nowego oleju 5W40. Zarówno w temperaturze 40 i jak i 100°C nastąpiło zatarcie wężła ciernego podczas smarowania olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu.



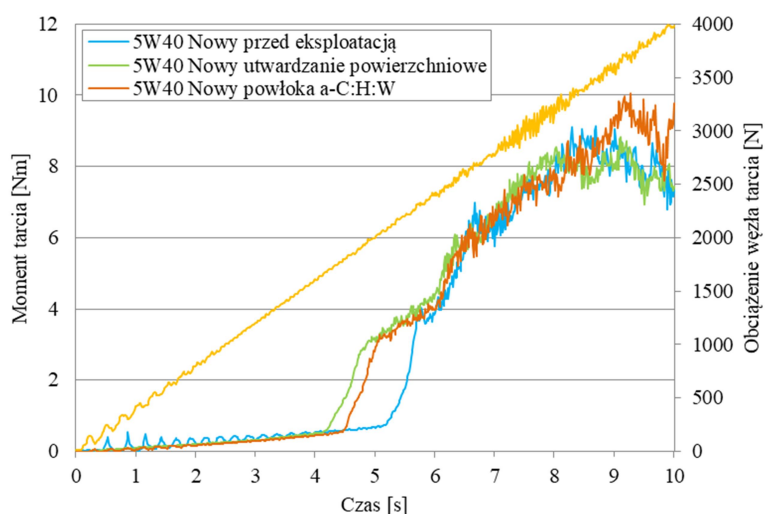
Rysunek 5.31. Graniczny nacisk zatarcia  $p_{oz}$  badanych olejów przed eksploatacją w styku liniowym

Obliczone wartości granicznego nacisku zatarcia  $p_{oz}$  wykazują istotne różnice. W temperaturze 40°C najwyższą odporność na zatarcie ma olej biodegradowalny 10W40 (363,8 N/mm<sup>2</sup>), następnie olej zużyty 5W40 (251,1 N/mm<sup>2</sup>) oraz olej PAO8 + MoS<sub>2</sub> (173,8 N/mm<sup>2</sup>) (rys. 5.31). Najniższą odporność na zatarcie wykazuje olej nowy 5W40 (143,5 N/mm<sup>2</sup>). W temperaturze badania 100°C występuje identyczna kolejność olejów, jak opisana w temperaturze 40°C. Wartość granicznego nacisku zatarcia  $p_{oz}$  wyznaczona dla oleju biodegradowalnego 10W40 nieznacznie spadła (354,9 N/mm<sup>2</sup>) w temperaturze 100°C. Natomiast graniczny nacisk zatarcia oleju nowego 5W40 wzrósł o 0,4% względem temperatury 40°C (144,1 N/mm<sup>2</sup>), oleju zużytego 5W40 obniżył się o 22,6% (194,4 N/mm<sup>2</sup>), a oleju bazowego z dodatkiem dwusiarczku molibdenu zmniejszył się o 15% (147,7 N/mm<sup>2</sup>). Olej bazowy PAO8 z dwusiarczkiem molibdenu posiada taką samą odporność na zatarcie (w 100°C) lub wyższą (w 40°C) jak olej nowy 5W40. Odporność na zatarcie oleju zużytego 5W40 w temperaturze 40°C obliczona na podstawie granicznego nacisku zatarcia jest o 75% wyższa względem oleju nowego 5W40, zaś w temperaturze 100°C wzrost wartości nacisku  $p_{oz}$  sięga 34,9%.

### 5.3.1. Porównanie właściwości przeciwzatarciowych środków smarowych

Po badaniach zużycia w styku liniowym, próbki olejów zostały poddane badaniom z wykorzystaniem aparatu czterokulowego, celem określenia zmian ich właściwości przeciwzatarciowych.

Inicjacja procesu zacierania w skojarzeniu smarowanym olejem nowym 5W40 w temperaturze 40°C wystąpiła przy obciążeniu wężła tarcia 2040 N. Natomiast w skojarzeniach smarowanych olejem 5W40 po próbach zużycia w styku liniowym obciążenie  $P_t$  obniżyło się do wartości 1605,6 N przy smarowaniu olejem stosowanym w parach z płytkami utwardzanymi powierzchniowo oraz do wartości 1741,2 N przy smarowaniu olejem stosowanym w skojarzeniach z płytkami z powłoką węglową (rys. 5.32).

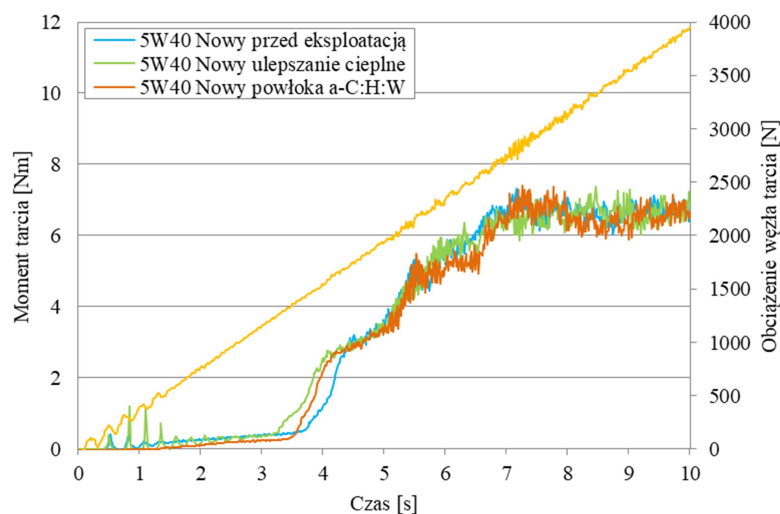


Rysunek 5.32. Moment tarcia  $M_t$  przy zmiennym obciążeniu styku czterokulowego dla oleju nowego 5W40 przed i po próbach w styku liniowym (temperatura 40°C)

W temperaturze 100°C obciążenia przy których wyznaczono początek procesu zacierania wężła były niższe niż podczas prób w temperaturze 40°C. Kolejność obciążeń  $P_t$  została zachowana i smarowanie olejem nowym 5W40 nieeksploatowanym w styku liniowym spowodowało zacieranie przy 1347,6 N, olejem eksploatowanym w parach z płytkami z powłoką przy 1270,8 N i olejem zastosowanym w parach z płytkami utwardzanymi powierzchniowo przy 1197,6 N (rys. 5.33).

Wyniki z prób z aparatu T-02U uzyskane dla olejów eksploatowanych w parach ciernych w styku liniowym z płytkami utwardzanymi powierzchniowo i płytkami z powłoką węglową zestawiono w tabeli 5.12. Właściwości przeciwzatarciowe  $P_t$  i  $p_{oz}$  olejów po użyciu do smarowania par z płytkami zaworowymi utwardzanymi powierzchniowo i z płytkami z powłoką a-C:H:W w styku liniowym porównano

z właściwościami olejów nieużywanych do smarowania par w próbach zużycia (rys. 5.34-5.35).

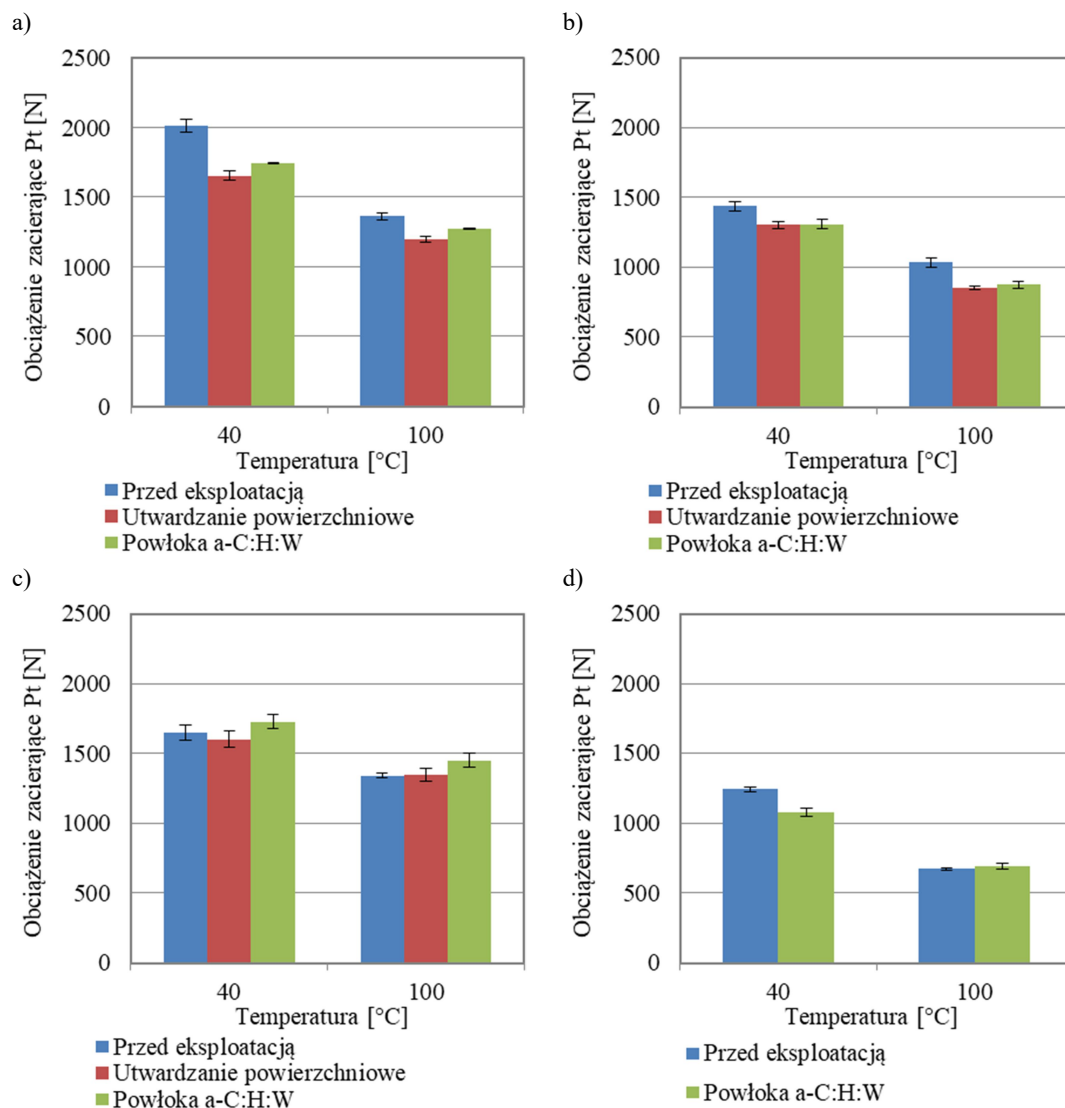


Rysunek 5.33. Moment tarcia  $M_t$  przy zmiennym obciążeniu styku czterokulowego dla oleju nowego 5W40 przed i po próbach w styku liniowym (temperatura 100°C)

Tabela 5.12. Właściwości przeciwzatarciowe środków smarowych po eksploatacji w styku liniowym

Kompozycja pary ciernej	Płytką zaworową utwardzana powierzchniowo				Płytką zaworową z powłoką a-C:H:W			
	Temperatura	40°C						
Olej smarowy	5W40 nowy	5W40 zużyty	10W40 biodeg.	PAO8 + MoS <sub>2</sub>	5W40 nowy	5W40 zużyty	10W40 biodeg.	PAO8 + MoS <sub>2</sub>
Ślad zużycia d [mm]	3,38	2,48	1,95	-	3,47	2,45	1,97	3,18
Obciążenie zacierające P <sub>t</sub> [N]	1653,2	1301,6	1602,0	-	1738,8	1305,6	1728,4	1078,0
Obciążenie zatarcia P <sub>oz</sub> [N]	3470,4	2988,4	2594,8	-	3473,2	3228,0	2871,6	3110,4
Graniczny nacisk zatarcia p <sub>oz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	157,9	252,7	356,0	-	150,4	278,8	384,4	160,1
Temperatura	100°C							
Olej	5W40 nowy	5W40 zużyty	10W40 biodeg.	PAO8 + MoS <sub>2</sub>	5W40 nowy	5W40 zużyty	10W40 biodeg.	PAO8 + MoS <sub>2</sub>
Ślad zużycia d [mm]	3,17	2,18	1,93	-	3,08	2,34	1,91	3,30
Obciążenie zacierające P <sub>t</sub> [N]	1198,4	852,4	1346,4	-	1268,8	874,8	1450,8	692,4
Obciążenie zatarcia P <sub>oz</sub> [N]	3211,6	2824,8	2362,8	-	2975,2	2386,4	2349,6	2914,0
Graniczny nacisk zatarcia p <sub>oz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	165,8	309,1	328,5	-	163,5	228,2	335,1	139,3





Rysunek 5.34 Obciążenie zacierające  $P_t$  olejów przed i po eksploatacji w styku liniowym: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS<sub>2</sub>

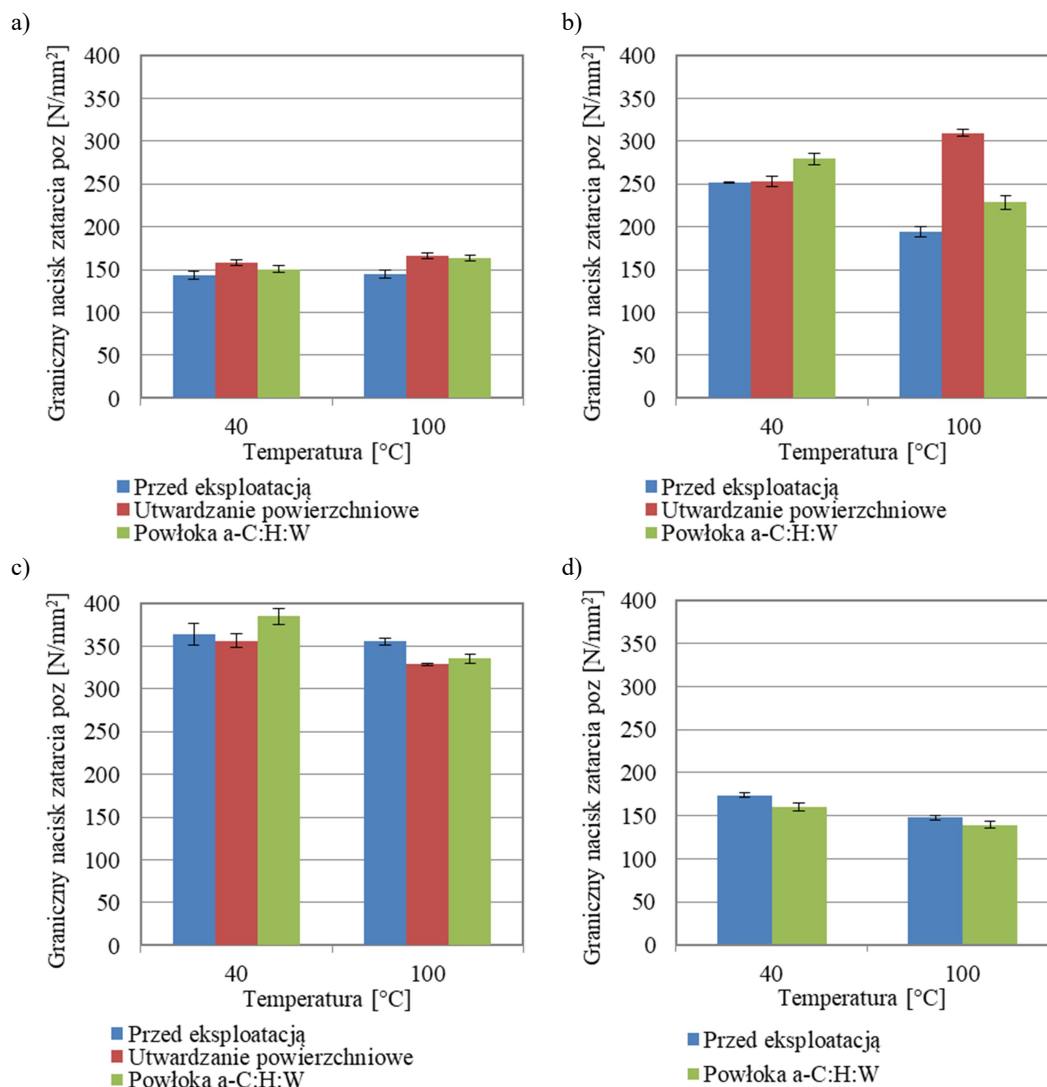
Rys. 5.34 przedstawia wartości obciążenia zacierającego  $P_t$  wyznaczone w styku czterokulowym smarowanym badanymi olejami. W temperaturze 40°C inicjacja zacierania pary ciernej smarowanej olejem nowym 5W40 przed eksploatacją w styku liniowym rozpoczyna się przy obciążeniu 2008,8 N (rys. 5.34a). Eksploatacja tego oleju w parach z płytkami utwardzonymi powierzchniowo spowodowała, że obciążenie zacierające obniżyło się o 17,7%, a oleju używanego do smarowania par z płytkami z powłoką a-C:H:W o 13,4%. Zwiększenie temperatury oleju do 100°C powoduje zmniejszenie wartości obciążenia zacierającego oleju przed eksploatacją do 1360 N. Oleje eksploatowane w styku liniowym wykazują mniejszą odporność na rozpoczęcie procesu zacierania – olej eksploatowany z płytkami utwardzonymi powierzchniowo - spadek o 11,9% względem oleju przed próbą zużycia, olej eksploatowany z płytkami

z powłoką – spadek o 6,7%. Najwyższą wartość obciążenia  $P_t$  podczas badań oleju zużytego 5W40 w temperaturze 40°C osiągnął olej przed testami na stanowisku T-05 i wyniosła ona 1436,4 N (rys. 5.34b). Eksploatacja w styku liniowym oleju zużytego 5W40 powoduje spadek obciążenia zacierającego względem oleju przed eksploatacją w styku liniowym. W temperaturze 40°C obciążenie zacierające oleju zużytego 5W40 eksploatowanego w parach z płytkami z powłoką węglową obniżyło się o 9,1%, a oleju zużytego 5W40 eksploatowanego z płytkami zaworowymi utwardzonymi powierzchniowo o 9,4%. Próby w 100°C wykazały spadki rzędu 17,7% (olej z par ciernych z płytkami utwardzonymi powierzchniowo) oraz 15,5% (olej z par ciernych z płytkami z powłoką a-C:H:W) względem obciążenia zacierającego oleju sprzed eksploatacji w styku liniowym (1035,2 N). Obciążenie  $P_t$  zmierzone dla nieeksploatowanego oleju biodegradowalnego 10W40 w temperaturze 40°C osiąga wartość 1650,4 N, a dla oleju biodegradowalnego 10W40 eksploatowanego w styku liniowym z płytkami utwardzonymi powierzchniowo nieznacznie spadło względem oleju przed eksploatacją (zmiana o 2,9%) (rys. 5.34c). Dla oleju eksploatowanego z płytkami z powłoką a-C:H:W zarejestrowany został wzrost obciążenia zacierającego rzędu 4,7% w porównaniu do oleju nieużywanego w próbach zużycia. Podczas prób w temperaturze 100°C wartość obciążenia  $P_t$  oleju biodegradowalnego 10W40 eksploatowanego w styku liniowym z płytkami utwardzonymi powierzchniowo nie uległa znaczącej zmianie (wzrost o 0,4%), a oleju po próbach z płytkami z powłoką węglową obciążenie wzrosło o 8,2% względem wartości odniesienia zarejestrowanej dla nieeksploatowanego oleju biodegradowalnego 10W40 (1340,8 N).

Wartość obciążenia zacierającego  $P_t$  oleju bazowego PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu przed eksploatacją w styku liniowym w temperaturze 40°C wyniosła 1244,4 N, a oleju pracującego w skojarzeniach z płytkami z powłoką a-C:H:W 1078 N – spadek o 13,4% (rys. 5.34d). W temperaturze 100°C różnice pomiędzy wartościami obciążenia zacierającego badanych olejów zmniejszyły się. Wartość wyznaczona dla oleju przed eksploatacją wyniosła 672,8 N, z kolei obciążenie dla oleju pracującego w styku liniowym z płytkami z powłoką węglową wzrosło, osiągając wartość 692,4 N. Smarowanie par ciernych z płytkami utwardzonymi powierzchniowo przy naciskach jednostkowych 2400 i 3000 N powodowało ich zatarcie przed osiągnięciem zakładanego czasu próby, co nie pozwoliło uzyskać reprezentatywnej próbki oleju. Wyniki dla oleju eksploatowanego z płytkami utwardzonymi

powierzchniowo nie zostały uwzględnione w analizie wyników obciążenia zacierającego i granicznego nacisku zatarcia.

Wartość granicznego nacisku zatarcia  $p_{oz}$  w temperaturze 40°C oleju nowego 5W40 przed eksploatacją w styku liniowym wyniosła 143,5 N/mm<sup>2</sup> (rys. 5.35a). Eksploatacja tego oleju w styku liniowym w parach ciernych z płytkami zaworowymi utwardzonymi powierzchniowo spowodowała wzrost wartości nacisku zatarcia o 10% względem oleju sprzed prób zużycia, a wzrost nacisku dla oleju po próbach z płytkami z powłoką węglową wyniósł 4,8%. Graniczne naciski zatarcia nie uległy znaczącej zmianie podczas badań w temperaturze 100°C.



Rysunek 5.35. Graniczny nacisk zatarcia  $p_{oz}$  olejów przed i po eksploatacji w styku liniowym: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS<sub>2</sub>

Wartość nacisku  $p_{oz}$  dla oleju nieeksploatowanego w styku liniowym wyniosła 144,1 N/mm<sup>2</sup> i jest porównywalna do wyznaczonej w temperaturze 40°C. Również

w temperaturze 100°C graniczne naciski zatarcia olejów eksploatowanych wykazują podobne wartości. Nacisk zatarcia dla oleju nowego 5W40 eksploatowanego w parach ciernych z płytkami utwardzanymi powierzchniowo zwiększył się o 15% względem oleju nieeksploatowanego, a oleju eksploatowanego z płytkami z powłoką a-C:H:W o 13,4%. Wartości granicznych nacisków zatarcia olejów nowych 5W40 są najniższe spośród badanych olejów i są porównywalne z wartościami wyznaczonymi dla oleju bazowego PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu.

Graniczny nacisk zatarcia  $p_{oz}$  w temperaturze 40°C wyznaczony dla oleju zużytego 5W40 eksploatowanego z płytkami utwardzanymi powierzchniowo w porównaniu do tego oleju nieużywanego w styku liniowym wzrósł o 0,6% (rys. 5.35b). Różnica pomiędzy olejem przed i po próbach zużycia zwiększa się do 10,8% w przypadku oleju eksploatowanego z płytkami z powłoką a-C:H:W. Zwiększenie temperatury oleju podczas badań na aparacie czterokulowym do 100°C powoduje wyraźne zróżnicowanie wartości. Wynik uzyskany dla zużytego oleju 5W40 przed eksploatacją w styku liniowym jest o 22,6% niższy w porównaniu do badania w temperaturze 40°C i wynosi 194,4 N/mm<sup>2</sup>. W temperaturze 100°C olej eksploatowany z płytkami utwardzanymi powierzchniowo osiąga wynik o 59% wyższy od oleju przed próbami w styku liniowym, a olej po próbach z płytkami z powłoką a-C:H:W o 17,4%.

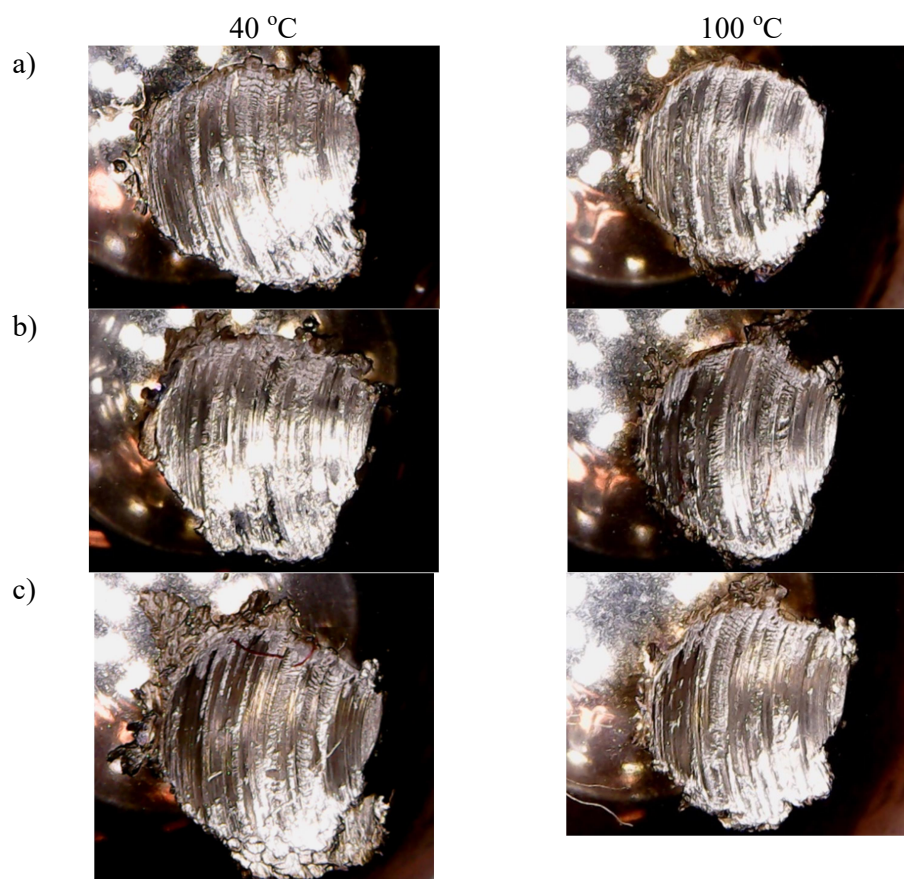
Najwyższe wartości granicznych nacisków zatarcia charakteryzują olej biodegradowalny 10W40 (rys. 5.35c). W temperaturze 40°C wartość nacisku  $p_{oz}$  olejów pracujących w próbach zużycia spada o 2,1% w przypadku eksploatacji z płytkami bez powłoki i rośnie o 5,7% po eksploatacji z płytkami z powłoką węglową względem wartości wyznaczonej dla oleju przed próbami zużycia (363,8 N/mm<sup>2</sup>). W temperaturze 100°C oleje po próbach zużycia w styku liniowym uzyskały niższe wartości granicznego nacisku zatarcia. Nacisk zatarcia dla oleju biodegradowalnego 10W40 po eksploatacji z płytkami utwardzanymi powierzchniowo względem nowego oleju zmniejszył się o 7,4%, a eksploatowany z płytkami z powłoką a-C:H:W o 5,6%.

Olej PAO8 + MoS<sub>2</sub> wykazuje słabą odporność na zatarcie węzła tarcia. W obu temperaturach badania najwyższe wartości granicznego nacisku zatarcia uzyskiwał olej przed eksploatacją w styku liniowym (rys. 5.35d). W temperaturze 40°C spadek nacisku zatarcia wartości względem oleju nieeksploatowanego w styku liniowym jest nieznaczny i wynosi 7,8% dla oleju użytego do smarowania par ciernych z próbkami z powłoką węglową. W badaniach w temperaturze 100°C różnica ta wynosi 5,7%.

Eksploatacja oleju 5W40 w silniku spalinowym samochodu osobowego wpłynęła na zwiększenie granicznego nacisku zatarcia w porównaniu do olejów nowych 5W40 (rys 5.34a-5.34b). Odwrotna tendencja występuje dla obciążeń zacierających  $P_t$ , będących odzwierciedleniem trwałości warstwy granicznej tworzonej przez olej (rys. 5.35a- 5.35b).

### 5.3.2. Ocena stanu warstwy powierzchniowej elementów pary cierniej

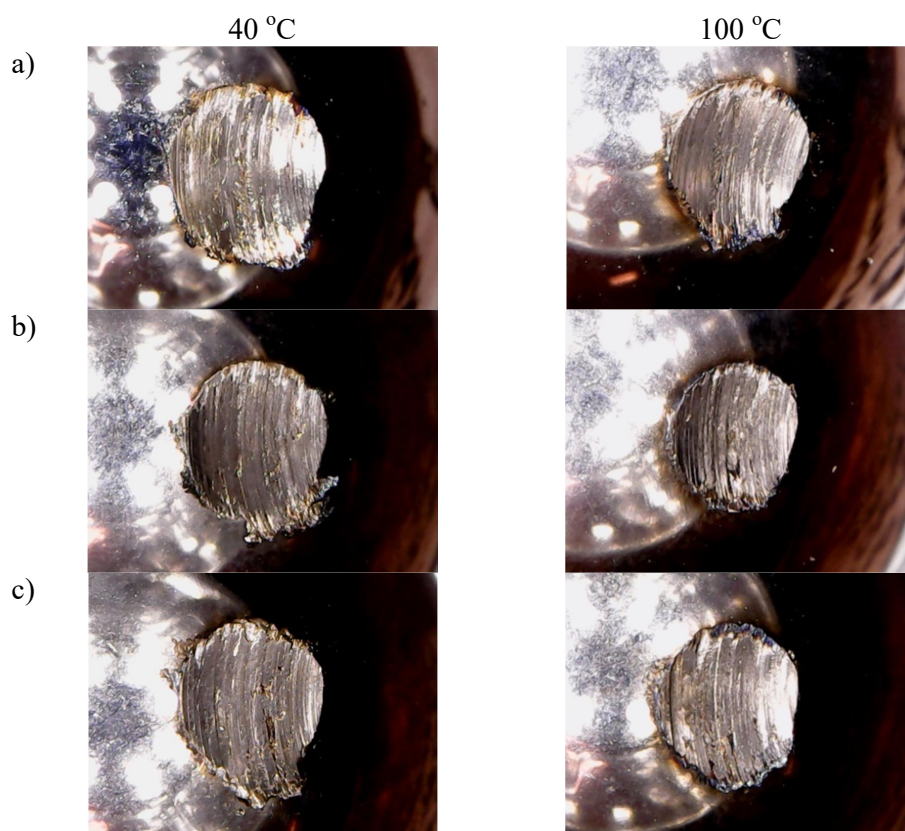
Po przeprowadzeniu prób na aparacie czterokulowym dokonano oceny zużycia warstwy powierzchniowej śladów wytarcia na nieruchomych kulkach wężła ciernego. W tym celu wykonano zdjęcia kulek łożyskowych z każdej z badanych kompozycji ciernych.



Rysunek 5.36. Ślady zużycia na kulkach łożyskowych po próbach na aparacie czterokulowym, smarowanie olejem nowym 5W40: a) przed eksploatacją w styku liniowym, b) po eksploatacji w styku liniowym z płytką utwardzaną powierzchniowo, c) po eksploatacji w styku liniowym z płytką z powłoką a-C:H:W

Ślady zużycia na kulkach smarowanych olejem nowym 5W40 przed eksploatacją i po eksploatacji w styku liniowym z płytkami utwardzonymi powierzchniowo po badaniach w temperaturze 40°C wykazują identyczny charakter (rys. 5.36). Krawędzie skaz są nieregularne, w dolnej części widoczne jest przeniesienie

materiału kulki. Zużycie kulki pracującej w oleju po eksploatacji z płytkami z powłoką a-C:H:W jest bardziej intensywne, na obwodzie skazy widać ślady wyrwania materiału, w górnej części obecne jest pęknięcie, a ilość przeniesionego materiału w dolnej części zdjęcia jest większa. W temperaturze 100°C intensywność zużycia jest niższa w porównaniu do wyników uzyskanych w 40°C. Najbardziej regularny kształt śladu zużycia ma kulka smarowana olejem nowym 5W40 nieeksploatowanym w styku liniowym. Kulki smarowane olejem po eksploatacji w styku liniowym prezentują zbliżoną do siebie intensywność zużycia. Nieco większa degradacja powierzchni nastąpiła w przypadku kulki smarowanej olejem 5W40 po próbach z płytkami z powłoką a-C:H:W (rys. 5.36).

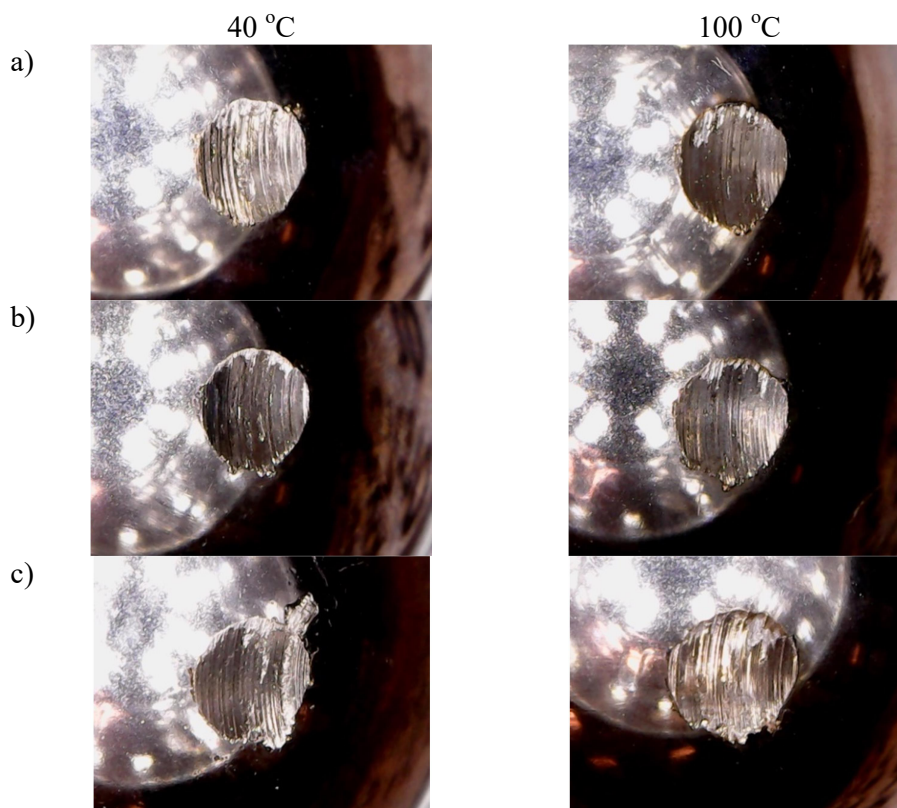


Rysunek 5.37. Ślady zużycia na kulkach łożyskowych po próbach na aparacie czterokulowym, smarowanie olejem zużytym 5W40: a) przed eksploatacją w styku liniowym, b) po eksploatacji w styku liniowym z płytką utwardzoną powierzchniowo, c) po eksploatacji w styku liniowym z płytką z powłoką a-C:H:W

Zużycie kulek badawczych po badaniach z olejem zużytym 5W40 (rys. 5.37) jest mniejsze w porównaniu do oleju nowego 5W40 (rys. 5.36). W temperaturze 40°C badane kulki smarowane olejem po próbach w styku liniowym wykazują większy stopień zużycia w porównaniu do kulek smarowanych olejem zużytym 5W40 przed próbami. Na zdjęciach widoczna jest większa ilość przeniesionego z obszaru tarcia

materiału, widoczne są także bruzdy i wyrwania, szczególnie dla kulek smarowanych olejem po próbach z płytkami z powłoką a-C:H:W.

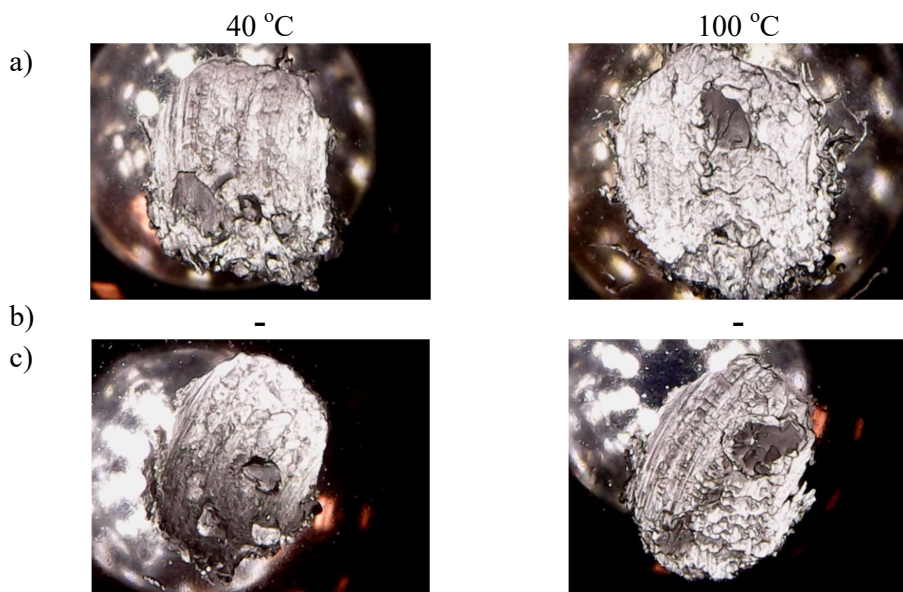
Ślady zużycia kulek po badaniach w 100°C w obecności oleju zużytego 5W40 przed eksploatacją w styku liniowym i po eksploatacji z płytkami z powłoką a-C:H:W mają niemal identyczny charakter (rys. 5.37). Na kulkach smarowanych olejem zużytym 5W40 po próbach w styku liniowym z płytkami utwardzonymi powierzchniowo wystąpiło niewielkie, w porównaniu do badań w temperaturze 40°C, przeniesienie materiału, powierzchnia posiada także bruzdy i wgłębienia wynikłe z wyrwania materiału kulki.



Rysunek 5.38. Ślady zużycia na kulkach łożyskowych po próbach na aparacie czterokulowym, smarowanie olejem biodegradowalnym 10W40: a) przed eksploatacją w styku liniowym, b) po eksploatacji w styku liniowym z płytką utwardzaną powierzchniowo, c) po eksploatacji w styku liniowym z płytką z powłoką a-C:H:W

Spośród badanych kompozycji ciernych najmniejsze zmiany w śladzie wytarcia występują na kulkach smarowanych olejem biodegradowalnym 10W40 (rys. 5.38). Ślady zużycia po badaniach w temperaturze 40°C uzyskane dla nieeksploatowanego oleju biodegradowalnego 10W40 i oleju po próbach z płytkami utwardzonymi powierzchniowo mają regularny kształt i występują niewielkie przeniesienia materiału. Większe zmiany powierzchni obserwowane są na kulkach po biegu badawczym

w obecności oleju biodegradowalnego 10W40 eksploatowanego z płytkami z powłoką a-C:H:W. Zwiększenie temperatury badania do 100°C nie spowodowało znaczących zmian w śladzie zużycia kulek łożyskowych (rys. 5.38). Na zdjęciach kulki pracującej w obecności oleju biodegradowalnego 10W40 przed eksploatacją w styku liniowym wystąpił obszar z przeniesionym materiałem, zmniejszyła się jednak liczba rys i bruzd na powierzchni skazy. Kształt śladu zużycia kulki smarowanej olejem po eksploatacji w styku liniowym z płytkami utwardzonymi powierzchniowo jest mniej regularny w porównaniu do tego, uzyskanego podczas badania w temperaturze 40°C – intensywność zużycia zwiększyła się. W obszarze tarcia kulki łożyskowej pracującej w oleju biodegradowalnym 10W40 po eksploatacji w styku liniowym z płytkami z powłoką węglową widoczny jest wzrost intensywności zużycia w porównaniu do badań przeprowadzonych w niższej temperaturze. W śladzie wytarcia występuje obszar zgrzania i wyrwania materiału kulki połączone z jego przeniesieniem, a rysy są głębsze i bardziej nieregularne.



Rysunek 5.39. Ślady zużycia na kulkach łożyskowych po próbach na aparacie czterokulowym, smarowanie olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub>: a) przed eksploatacją w styku liniowym, b) po eksploatacji w styku liniowym z płytką utwardzoną powierzchniowo, c) po eksploatacji w styku liniowym z płytką z powłoką a-C:H:W

Najbardziej intensywne zużycie kulek badawczych wystąpiło w trakcie prób z olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu (rys. 5.39). Zarówno badania oleju przed jak i po eksploatacji w styku liniowym w obu temperaturach oleju zakończyły się zatarciem węzła tarcia (osiągnięcie wartości momentu tarcia  $M_t=10$  Nm). W trakcie prób wystąpiło zgrzanie elementów kompozycji ciernej. Kształt



obrysu skaz jest nieregularny, widoczne są liczne przeniesienia i wyrwania materiału. Charakterystyczne dla kulek smarowanych olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub> jest występowanie ciemnych śladów w obrębie śladu zużycia. Są to prawdopodobnie miejsca w których nastąpiło zgrzanie kulek pod wpływem działania wysokiej temperatury w obszarze tarcia. Taki stan rzeczy najprawdopodobniej spowodowany jest brakiem dodatków smarnościowych w oleju bazowym, w szczególności dodatków typu EP. Największe zużycie spośród kulek badawczych zaobserwowano dla kulek smarowanych olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub> przed eksploatacją w styku liniowym.

W temperaturze 100°C zużycie kulek łożyskowych smarowanych olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub> jest większe w porównaniu do badań w temperaturze 40°C (rys. 5.39). Wymiary skaz uległy zwiększeniu, wyraźnie widoczne są miejsca, w których nastąpiło zgrzanie kulek badawczych. Tak jak w przypadku badań w niższej temperaturze najintensywniej zużyła się kulka pracująca w oleju przed eksploatacją z płytkami zaworowymi w styku liniowym.

## 6. PODSUMOWANIE BADAŃ I DYSKUSJA WYNIKÓW

Przedstawione w pracy wyniki badań pary ciernej próbka pierścieniowa - środek smarowy - przeciwpróbka mają charakter porównawczy. W trakcie realizacji badań określono wpływ obróbki powierzchniowej (ulepszanie cieplne, utwardzanie powierzchniowe, powłoka a-C:H:W) i rodzaju środka smarowego (nowy syntetyczny olej silnikowy SAE 5W40, zużyty syntetyczny olej silnikowy SAE 5W40, biodegradowalny syntetyczny olej SAE 10W40 i kompozycja syntetycznego oleju bazowego PAO8 z dodatkiem 2% wagowo nanocząstek MoS<sub>2</sub>) przy założonych parametrach wymuszenia (siła nacisku, nacisk jednostkowy, prędkość ślizgania) na procesy tribologiczne w konforemnym i niekonforemnym skojarzeniu ciernym. W trakcie badań oceniano dynamikę zmian procesu tarcia poprzez pomiar wskaźników ciągłych, takich jak moment tarcia, temperatura w obszarze tarcia, zużycie liniowe oraz wykonanie pomiarów zużycia masowego i zmian struktury geometrycznej powierzchni współpracujących elementów. Wyniki uzyskane na stanowisku badawczym pozwalają stwierdzić, że istnieją mierzalne różnice w pracy skojarzenia ślizgowego w zależności od zastosowanej obróbki powierzchniowej i rodzaju środka smarowego.

W badaniach par ciernych z powłoką a-C:H:W w styku rozłożonym z wycinkami panwi łożysk ślizgowych ze stopu CuPb30 zaobserwowano pogorszenie warunków tarcia w badanych warunkach współpracy skojarzeń ciernych w stosunku do par z warstwą powierzchniową ulepszaną cieplnie. Znajduje to odzwierciedlenie zarówno w zmierzonych wartościach momentu rozruchowego, siły tarcia przy ustalonej prędkości ślizgania, momentu tarcia rejestrowanego pod koniec prób zużycia, temperaturach w obszarze tarcia, a przede wszystkim w wielkości zużycia liniowego i ubytkach masowych przeciwpróbek ze stopu łożyskowego CuPb30. Znaczącej zmianie uległa również chropowatość powierzchni roboczych elementów par ciernych, będąca następstwem zarówno procesów docierania, jak i zużycia elementów skojarzenia trącego.

Zastosowanie powłoki węglowej na próbce pierścieniowej w parze ciernej skutkowało znacznym wzrostem maksymalnego momentu tarcia w trakcie rozruchu względem pary ciernej z próbką bez powłoki. W przypadku smarowania pary ciernej olejem nowym 5W40 zaobserwowano maksymalny wzrost o 38,3% (20 MPa), olejem zużytym 5W40 o 42,8% (5 MPa), olejem biodegradowalnym 10W40 o 44,3% (5 MPa), olejem bazowym PAO8 + MoS<sub>2</sub> o 70,2% (10 MPa) (rys. 5.3). W niektórych

skojarzeniach wystąpiły warunki tarcia, które spowodowały, że moment tarcia podczas rozruchu wężła był niższy (olej nowy 5W40 – nacisk jednostkowy 10 MPa, olej bazowy PAO8 + MoS<sub>2</sub> – nacisk jednostkowy 5 MPa) lub porównywalny dla obu rodzajów obróbki powierzchniowej (olej biodegradowalny 10W40 – nacisk jednostkowy 10 MPa). W przebiegach współczynnika tarcia w trakcie rozruchu przy nacisku jednostkowym 20 MPa widoczna jest tendencja do stabilizacji procesów tarcia przy niższych prędkościach ślizgania w parach ciernych z próbkami z powłoką a-C:H:W w porównaniu do par z próbkami ulepszanymi cieplnie (rys. 5.1-5.2). Smarowanie olejem zużyтым 5W40 powoduje opóźnienie stabilizacji wartości współczynnika tarcia w parze ciernej z próbką ulepszaną cieplnie i brak stabilizacji wartości współczynnika tarcia podczas rozruchu w parze z próbką z powłoką a-C:H:W. Najwyższy współczynnik tarcia spośród par ciernych z pierścieniem ulepszanym cieplnie zarejestrowano podczas rozruchu pary smarowanej olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub> – 0,061, najniższy – podczas smarowania olejem nowym 5W40 – 0,049 (rys. 5.1). Spośród par ciernych z próbkami z powłoką a-C:H:W najwyższy współczynnik zmierzono podczas smarowania olejem nowym 5W40 – 0,069, a najniższy – przy użyciu oleju biodegradowalnego 10W40 – 0,052 (rys. 5.2).

Istotne zmiany w funkcjonowaniu wężła tarcia zaobserwowano podczas pomiaru siły tarcia w warunkach ustalonej prędkości ślizgania, w trakcie których różnica pomiędzy parami z próbką z powłoką węglową a-C:H:W i smarowaniu olejem zużyтым 5W40 oraz biodegradowalnym 10W40 była nawet kilkunastokrotnie wyższa w porównaniu do par z próbkami ulepszanymi cieplnie (ponad 16-krotnie wyższa przy nacisku jednostkowym 5 MPa i smarowaniu olejem zużyтым 5W40) (rys. 5.6). Smarowanie obszaru tarcia olejem nowym 5W40 powoduje wzrost oporów tarcia dochodzący do 113% przy nacisku jednostkowym 20 MPa oraz redukcję siły tarcia o 75% przy nacisku jednostkowym 5 MPa (rys. 5.6a). Natomiast smarowanie kompozycją oleju bazowego PAO8 + MoS<sub>2</sub> powoduje w parze ciernej z powłoką niższe siły tarcia w stosunku do pary z elementem ulepszanym cieplnie w całym zakresie badanych nacisków, nawet czterokrotnie niższą przy nacisku jednostkowym 5 MPa (rys. 5.6d). Zarejestrowane równocześnie z siłą tarcia wartości temperatury w obszarze styku pary ciernej pod koniec próby wykazują zbliżone wartości, jednak można zaobserwować, że zastosowanie powłoki a-C:H:W generalnie obniża temperaturę w obszarze tarcia w porównaniu do par z powierzchnią ulepszaną cieplnie (rys. 5.7). Natomiast w parach smarowanych olejem biodegradowalnym

10W40 zmierzono wyższe temperatury (naciski jednostkowe 15-20 MPa) lub zbliżone w parach z powłoką a-C:H:W (naciski jednostkowe 5-10 MPa) (rys. 5.7c).

Pomiary zużycia masowego elementów pary ciernej wykazały brak mierzalnego zużycia próbki pierścieniowej, natomiast można obserwować istotne zużycie stopu łożyskowego CuPb30. Zastosowanie powłoki węglowej na próbce pierścieniowej w parze ciernej skutkowało znacznym wzrostem zużycia masowego stopu CuPb30, przy smarowaniu pary ciernej olejem nowym 5W40 wzrost jest 11-krotny (nacisk jednostkowy 20 MPa), olejem zużytym 5W40 wzrost 7-krotny (nacisk jednostkowy 15 MPa), olejem biodegradowalnym 10W40 wzrost 27-krotny (nacisk jednostkowy 5 MPa) i kompozycją olej bazowy PAO8 + MoS<sub>2</sub> wzrost 46-krotny (nacisk jednostkowy 15 MPa) w porównaniu do zużycia stopu CuPb30 w skojarzeniu z powierzchnią ulepszaną cieplnie (rys. 5.13).

Pomiary zużycia liniowego potwierdzają tendencje zmian zaobserwowanych podczas pomiarów zużycia masowego (rys. 5.12). Wykonane pomiary momentu tarcia i temperatury podczas prób zużycia wykazują również istotne różnice, przy czym zmierzone wielkości są znacznie wyższe w skojarzeniach z powłoką w porównaniu do par z elementami ulepszanymi cieplnie (rys. 5.10-5.11). Opory tarcia w parach z próbkami z powłoką a-C:H:W smarowanych olejem nowym 5W40 są niemal czterokrotnie większe w zakresie obciążeń 15-20 MPa w porównaniu do par z próbkami ulepszanymi cieplnie. W parach smarowanych olejem zużytym 5W40 moment tarcia w parze ciernej z próbką z powłoką przy nacisku jednostkowym 5 MPa jest o 645% wyższy niż w parze z próbką ulepszaną cieplnie. Przy smarowaniu skojarzenia ciernego z próbkami z powłoką węglową olejem biodegradowalnym 10W40 zarejestrowano 17-krotny wzrost momentu tarcia przy nacisku jednostkowym 5 MPa w porównaniu do skojarzenia z próbką bez powłoki. Smarowanie olejem biodegradowalnym 10W40 generuje również najwyższe opory tarcia spośród badanych par ciernych przy naciskach jednostkowych 20 MPa – 5,1 Nm. W parach ciernych smarowanych olejem bazowym PAO8 z dodatkiem MoS<sub>2</sub>, przy maksymalnym badanym nacisku jednostkowym można obserwować mniejsze różnice oporów ruchu pomiędzy parami z powierzchnią ulepszaną cieplnie a powłoką, niż w pozostałych skojarzeniach trących. W porównaniu do smarowania olejem biodegradowalnym 10W40 moment tarcia przy nacisku jednostkowym 20 MPa w parze z powłoką jest dwukrotnie niższy (rys. 5.10). W skojarzeniach z powłoką a-C:H:W smarowanych olejem nowym i zużytym 5W40 oraz olejem biodegradowalnym 10W40 przy nacisku

jednostkowym 20 MPa zmierzono prawie dwukrotnie wyższe temperatury niż w skojarzeniach z próbkami ulepszanymi cieplnie. Natomiast smarowanie olejem bazowym PAO8 z dodatkiem MoS<sub>2</sub> spowodowało wyrównanie temperatur w badanych parach (naciski jednostkowe 20 MPa), a przy naciskach 10 MPa skojarzenie z powłoką generowało niższą temperaturę niż w parach z elementem ulepszanym cieplnie. Spośród par ciernych z próbkami z powłoką, pracujących w próbach zużycia przy maksymalnym nacisku jednostkowym podczas smarowania olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub>, zarejestrowano najniższe temperatury w porównaniu z pozostałymi środkami smarowymi (rys. 5.11).

Próby zużycia ukształtowały strukturę geometryczną powierzchni elementów par ciernych, która znacząco różni się od tej ukształtowanej w procesach wytwórczych (tabele 5.4-5.6). Pomiary parametrów chropowatości (Ra, Rz, Rq i RSm) powłoki a-C:H:W w decydującej większości skojarzeń wykazały zmniejszenie ich wartości, niezależnie od zastosowanego środka smarowego. Natomiast pomiary chropowatości warstwy powierzchniowej ulepszonej cieplnie wykazały zależność jej chropowatości powierzchni od zastosowanego oleju smarowego i obciążenia wężła ciernego. Zastosowanie w parze cierniej do smarowania kompozycji oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> determinuje wzrost mierzonych parametrów chropowatości próbki pierścieniowej lub nieznaczne ich obniżenie. Użycie oleju nowego 5W40 generuje wzrost chropowatości powierzchni, przy czym wraz ze wzrostem obciążenia wężła tarcia występuje jej zmniejszenie (parametr Ra i Rq), a zastosowanie oleju zużytego 5W40 spowodowało znaczne zmniejszenie chropowatości przy naciskach 10-15 MPa i wzrost przy maksymalnym nacisku jednostkowym (parametr Rz, Rq i RSm). Natomiast smarowanie olejem biodegradowalnym 10W40 spowodowało znaczne wzrosty wszystkich parametrów chropowatości próbki pierścieniowej ulepszonej cieplnie zmierzonych przy nacisku jednostkowym 15 MPa, a spadki przy nacisku 10 i 20 MPa. Pomiary chropowatości powierzchni przeciwpróbki ze stopu łożyskowego CuPb30 wykazały istotne zmniejszenie chropowatości w skojarzeniu z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie i to przy smarowaniu wszystkimi badanymi środkami smarowymi. Istotne odrębności dotyczą zmiany parametru RSm przy smarowaniu obszaru tarcia olejem nowym 5W40 (kilkusetprocentowy wzrost przy nacisku jednostkowym 10 i 20 MPa), olejem biodegradowalnym 10W40 (kilkudziesięcioprocentowy wzrost przy nacisku jednostkowym 20 MPa) oraz kompozycją oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> przy nacisku 20 MPa (wzrost parametrów chropowatości Rz, Rq i RSm). Zastosowanie w parze cierniej powłoki a-C:H:W spowodowało istotne wzrosty chropowatości powierzchni

przeciwpróbki ze stopu łożyskowego CuPb30, szczególnie przy smarowaniu olejem nowym 5W40 (wzrost wszystkich mierzonych parametrów w całym zakresie nacisków jednostkowych 10-20 MPa), olejem zużytym 5W40 (wzrost mierzonych parametrów w zakresie nacisków jednostkowych 10-15 MPa i parametru RSm przy nacisku jednostkowym 20 MPa) oraz kompozycją oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> przy nacisku jednostkowym 10 MPa. Kompozycja oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> spowodowała natomiast zmniejszenie parametrów chropowatości Ra, Rz i Rq przy wyższych naciskach jednostkowych 15 i 20 MPa. Zastosowanie do smarowania oleju biodegradowalnego 10W40 spowodowało poważne zmniejszenie chropowatości powierzchni przeciwpróbki, szczególnie przy najniższym nacisku 10 MPa i nieznacznym wzroście parametru chropowatości RSm przy nacisku jednostkowym 15 i 20 MPa.

Zmiany w procesach tarcia i zużycia występujące w obszarze rozłożonego styku par ciernych zależą od nacisków jednostkowych pomiędzy współpracującymi powierzchniami, zmian w mikrostrukturze warstwy powierzchniowej, reakcji chemicznych pomiędzy materiałami, transferu materiału i nieciągłości właściwości warstw powierzchniowych elementów węzła ciernego [92]. W pracy wykazano, że powłoka a-C:H:W zastosowana w węzłach ciernych pracujących w obecności olejów handlowych (nowy i zużyty 5W40, biodegradowalny 10W40), generuje warunki tarcia utrudniające powstanie stabilnych warunków współpracy. Jedynie smarowanie kompozycją olejową PAO8 + MoS<sub>2</sub> wskazuje na potencjalnie sprzyjające warunki do wytworzenia stabilnych warunków współpracy w parze z powłoką a-C:H:W w warunkach tarcia, zbliżonych do tych w parze z warstwą powierzchniową ulepszaną cieplnie przy smarowaniu tym olejem, na co wskazują przebieg współczynnika tarcia i zużycia liniowego (rys. 5.8-5.9). Smarowanie par ciernych z próbkami pierścieniowymi ulepszanymi cieplnie i z powłoką a-C:H:W badanymi olejami w sposób znaczący kształtuje procesy tarcia i zużycia poprzez formowanie warstw granicznych będących wynikiem reakcji warstw powierzchniowych elementów pary cierniej i środków smarowych, w tym siarki zawartej w dodatku MoS<sub>2</sub>. Różnica w oporach ruchu i temperaturze w obszarze styku w skojarzeniach smarowanych olejami nowym i zużytym 5W40 najprawdopodobniej jest wynikiem niepełnego działania dodatków uszlachetniających, które w czasie eksploatacji reagują z materiałem węzła ciernego, obniżając tym samym współczynnik tarcia [76, 93]. Odmienne parametry tarcia rejestrowane w przypadku oleju nowego i eksploатовanego 5W40 mogą wynikać także z obecności w oleju zużytym związków chemicznych,

będących następstwem reakcji tribochemicznych dodatków uszlachetniających i materiałów konstrukcyjnych silnika, obniżających tarcie i zużycie podczas eksploatacji [24, 76, 93]. W trakcie eksploatacji olej smarowy zmienia swoje właściwości i gromadzi zanieczyszczenia, które pogarszają warunki smarowania, zwiększając tym samym intensywność procesów zużycia. W korzystnych warunkach smarowania produkty zużycia mogą być jednak usuwane z obszaru styku elementów węzła tarcia. Pomimo tego, w wyniku reakcji tribochemicznych, w węźle tarcia mogą zachodzić procesy korozyjne i zużycie kawitacyjne, a na skutek dynamicznych zmian ciśnienia w obszarze tarcia, także zużycie zmęczeniowe. W przypadku powłok węglowych obserwowany jest dodatkowo spadek wytrzymałości zmęczeniowej powierzchni, co może dodatkowo intensyfikować procesy zużycia zachodzące w parze ciernej w wyniku wykruszania powłoki [17]. Jeśli wystąpi intensyfikacja procesów zużycia elementów pary ciernej, wzrasta zanieczyszczenie oleju produktami zużycia, co wpływa na szybszą degradację właściwości użytkowych oleju smarowego i zmniejszoną trwałość węzła tarcia [92, 94]. Biorąc pod uwagę powyższe procesy, eksploatacja par ciernych z powłokami a-C:H:W w styku rozłożonym wymaga tworzenia dedykowanych olejów do pracy w skojarzeniach ciernych z tą powłoką [10, 17, 56, 79].

Zużycie przeciwpróbek ze stopu łożyskowego CuPb30 spowodowane jest przede wszystkim przez twarde obszary warstwy powierzchniowej materiału próbek pierścieniowych (powłoki) oraz twarde produkty zużycia prowadzące do kontaktu warstw powierzchniowych i zwiększonego zużycia ściernego bardziej miękkiego materiału łożyskowego [55, 68, 95]. Twarde produkty zużycia powstałe wskutek procesów tarcia powodują występowanie takich zjawisk jak wykruszanie, ścinanie i ścieranie, które mogą intensyfikować procesy zużycia powierzchni par ciernych [96]. Możliwe, że intensywne zużycie stopu łożyskowego spowodowane jest również przez skrawanie ostrymi krawędziami uszkodzonych obszarów powłoki (wykruszenia, wyrwania, rysy) [97].

Obserwacja struktury geometrycznej warstwy wierzchniej wykazała znaczącą reorganizację, efektem której jest zmiana chropowatości warstw wierzchnich obu elementów pary ciernej i powstanie eksploatacyjnej warstwy wierzchniej [92]. Zmiana parametrów chropowatości powierzchni wynika głównie z dopasowywania się współpracujących powierzchni obu elementów pary ciernej do warunków obciążenia węzła ciernego. Powstała w ten sposób struktura geometryczna powierzchni zapewnia

parze ciernej optymalną funkcjonalność, będącą wynikiem wytworzenia trwałych warstw powierzchniowych na obu elementach pary ciernej [95, 98].

Zastosowanie powłoki a-C:H:W na powierzchni roboczej regulatorów luzu zaworowego podczas prób w styku liniowym z pierścieniami ulepszanymi cieplnie wpłynęło na poprawę warunków tarcia w badanych skojarzeniach ciernych smarowanych badanymi olejami. W porównaniu do par ciernych z handlowymi płytkami zaworowymi utwardzanymi powierzchniowo w parach z płytkami z powłoką widoczne jest m.in. zredukowanie momentu rozruchowego, obniżenie temperatur w obszarze tarcia, zmniejszenie szerokości śladu zużycia i współczynnika tarcia w większości badanych skojarzeń par ciernych.

Para cierna z płytką z powłoką a-C:H:W smarowana olejem biodegradowalnym 10W40 i kompozycją oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> charakteryzuje się niższym momentem rozruchowym w porównaniu do pary z płytką zaworową utwardzaną powierzchniowo (rys. 5.17). Jednak wartości momentu rozruchowego są wyższe niż w przypadku zastosowania do smarowania olejów 5W40. Przy zastosowaniu oleju nowego 5W40 występuje nieznacznie mniejszy moment rozruchowy w parach z płytkami utwardzanymi powierzchniowo, szczególnie przy niskiej sile nacisku 1200 i 1800 N i większy lub zbliżony przy sile nacisku 2400 i 3000 N. Zastosowanie oleju zużytego 5W40 do smarowania obszaru styku tylko przy nacisku 1800 N spowodowało obniżenie momentu rozruchowego w skojarzeniu z płytką utwardzaną powierzchniowo, a przy pozostałych wartościach siły nacisku smarowanie tym olejem spowodowało obniżenie momentu rozruchowego w skojarzeniu z płytką z powłoką a-C:H:W. Można również zaobserwować, że olej zużyty 5W40 w parze z płytką utwardzaną powierzchniowo generuje wyraźnie wyższe wartości momentu rozruchowego w porównaniu do oleju nowego 5W40, czego nie obserwuje się w parach z powłoką a-C:H:W.

Szerokość śladów zużycia na powierzchni płytek zaworowych z powłoką a-C:H:W w parach ciernych smarowanych olejami 5W40 jest mniejsza niż w przypadku płytek utwardzanych powierzchniowo (rys. 5.22). Smarowanie obszaru tarcia olejem nowym 5W40 spowodowało zmniejszenie śladu zużycia na płytce zaworowej z powłoką a-C:H:W od 13 do 23,6% w badanym zakresie siły nacisku 1800-3000 N. Natomiast w skojarzeniu smarowanym olejem zużytym 5W40 występują niewielkie różnice w wartościach szerokości śladu zużycia przy sile nacisku 1800 i 2400 N dla obu ukształtowanych warstw powierzchniowych, a różnica nie przekracza 3,3%. Istotna różnica w tych warunkach smarowania wystąpiła przy maksymalnej sile nacisku



i wyniosła 24% (199,5  $\mu\text{m}$ ). W warunkach smarowania olejem biodegradowalnym 10W40 i sił nacisku 2400 i 3000 N ślady wytarcia na płytkach utwardzanych powierzchniowo są mniejsze w stosunku do płytek z powłoką a-C:H:W oraz mniejsze od śladów wytarcia na płytkach utwardzanych powierzchniowo w skojarzeniach smarowanych olejami 5W40. Ślad zużycia płytek zaworowych z powłoką węglową po próbach z naciskiem 1800 N w obecności oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> jest mniejszy o 31,2% w porównaniu do śladu zmierzonego na płytkach utwardzanych powierzchniowo. Ślady zużycia płytek utwardzanych powierzchniowo, które uległy zatarciu przedwcześnie są wyższe o 16,5 i 26,2% w porównaniu do śladów zużycia płytek z powłoką, które przepracowały zakładany czas próby 1800 s (rys. 5.22). Analiza zdjęć powierzchni śladów zużycia płytek zaworowych po próbach w styku liniowym wykazała mniej intensywne zużycie płytek zaworowych z powłoką a-C:H:W w porównaniu do ich wersji handlowej (utwardzanej powierzchniowo) (rys. 5.23-5.26). Z obserwacji zdjęć śladów zużycia płytek zaworowych po próbach zużycia w styku liniowym wynika, że powłoka a-C:H:W w większości badanych skojarzeń znacząco lub częściowo ogranicza zużycie powierzchni płytki w porównaniu do płytek utwardzanych powierzchniowo. Jest to szczególnie wyraźne podczas smarowania obszaru tarcia kompozycją oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub>, w której ślady zużycia powierzchni płytek z powłoką a-C:H:W wykazują wielkość zużycia zbliżoną do płytek z powłoką podczas smarowania olejami handlowymi. Natomiast, gdy szerokość śladu zużycia płytek utwardzanych powierzchniowo po próbach z minimalną siłą nacisku osiąga wartość 850,5  $\mu\text{m}$  jest to największy ślad wytarcia wśród badanych skojarzeń ciernych w analizowanym zakresie sił nacisku (rys. 5.26).

Zmierzone pod koniec prób zużycia w styku liniowym wartości siły tarcia wskazują jednoznacznie na obniżenie poziomu oporów ruchu w parach ciernych, w których zastosowano płytki zaworowe z powłoką a-C:H:W przy smarowaniu badanymi olejami w porównaniu do par z płytkami utwardzonymi powierzchniowo (rys. 5.20). Siła tarcia pod koniec prób zużycia w styku liniowym w parach ciernych również istotnie zależy od środka smarowego i można zaobserwować, że najniższe wartości siły tarcia występują w parach smarowanych olejami 5W40, a następnie olejem biodegradowalnym 10W40. Jednak zastosowanie do smarowania oleju nowego 5W40 powoduje większy spadek wartości siły tarcia pomiędzy badanymi warstwami powierzchniowymi i wynosi on od 28 do 36,2%, a dla oleju zużytego 5W40 od 17,9 do 30,9% w porównaniu do par z płytkami utwardzonymi powierzchniowo. Najistotniejsze

zmiany obserwowano podczas smarowania kompozycją olejową PAO8 + MoS<sub>2</sub>, w której zastosowanie płytki zaworowej utwardzanej powierzchniowo spowodowało wzrost siły tarcia powyżej możliwości pomiarowych stanowiska i przerwanie próby. Pomiar siły tarcia przy najniższej sile nacisku (1800 N) są porównywalne co do wartości do zmierzonych w parach smarowanych olejem biodegradowalnym 10W40. Natomiast zastosowanie powłoki a-C:H:W pozwoliło wykonać pomiary siły tarcia przy wszystkich siłach nacisku, a uzyskane wartości siły tarcia są porównywalne z siłą tarcia w parach smarowanych olejem biodegradowalnym 10W40 (rys. 5.20).

Podobne trendy zmian, jak w pomiarach siły tarcia, można obserwować w pomiarach temperatury, gdzie najniższe wartości temperatur występują w skojarzeniu z płytkami zaworowymi z powłoką a-C:H:W i smarowaniu obszaru tarcia olejami 5W40. W parach smarowanych olejem nowym 5W40 temperatura w obszarze tarcia z płytkami z powłoką jest niższa od 10,6 do 18,2°C względem par z płytkami utwardzonymi powierzchniowo, a w parach smarowanych olejem zużyтым 5W40 różnice wynoszą od 5,6 do 21,7°C (rys. 5.21). Zbliżone wartości temperatury do par smarowanych olejami 5W40 zmierzono w parach smarowanych olejem biodegradowalnym 10W40, przy czym powłoka a-C:H:W powoduje nieznaczny wzrost temperatury w obszarze tarcia. Temperatura zarejestrowana w skojarzeniach ciernych smarowanych kompozycją oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> przy sile nacisku 1800 N jest porównywalna do temperatury w parach smarowanych olejem biodegradowalnym 10W40. Wartości zmierzone w parach ciernych smarowanych olejem PAO8 z dodatkiem MoS<sub>2</sub> przy naciskach 2400 i 3000 N nie mogą być porównane ze względu na zatarcie par ciernych z płytkami utwardzonymi powierzchniowo przed osiągnięciem zadanego czasu próby (rys. 5.21d).

Pomiary parametrów chropowatości Ra, Rz, Rq i RSm umożliwiły ocenę zmian w strukturze geometrycznej powierzchni roboczych elementów par ciernych pracujących w warunkach maksymalnej siły nacisku 3000 N w porównaniu do nowych elementów skojarzenia (tabela 5.10). Wzrost wszystkich mierzonych parametrów chropowatości obserwowany jest na powierzchni pierścieni ulepszanych cieplnie, pracujących z płytkami utwardzonymi powierzchniowo i trend ten dotyczy również użytych środków smarowych. Największe zmiany parametrów chropowatości występują w parach smarowanych olejem zużyтым 5W40, w których parametry chropowatości próbki pierścieniowej ulepszonej cieplnie zwiększyły się ponad dwukrotnie. Pracująca w tym skojarzeniu powierzchnia płytki zaworowej utwardzanej

powierzchniowo wykazuje również wzrost chropowatości powierzchni przy smarowaniu olejem zużytym 5W40, natomiast w warunkach smarowania olejem nowym 5W40 (Ra, Rq i RSm) oraz biodegradowalnym 10W40 (Ra, Rz i Rq) wykazuje nieznaczne zmniejszenie chropowatości. Chropowatość płytek zaworowych przy smarowaniu olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub> po próbach zużycia zakończonych zatarciem pary ciernej wzrosła, przy czym obserwowana jest duża rozbieżność chropowatości powierzchni pomiędzy próbkami pierścieniowymi a płytkami zaworowymi utwardzanymi powierzchniowo (procentowo większe zmiany chropowatości powierzchni wystąpiły na powierzchni próbki pierścieniowej). W pomiarach parametrów chropowatości powierzchni elementów pary ciernej, próbka pierścieniowa ulepszana cieplnie - płytka zaworowa z powłoką a-C:H:W, można zaobserwować dwie grupy zmian w zależności od zastosowanego środka smarowego. Parametry chropowatości Ra, Rz i Rq zarówno próbki pierścieniowej jak i płytki z powłoką a-C:H:W przy smarowaniu olejami 5W40 zmniejszyły się, a parametr RSm wzrósł (przy czym zmiana na powierzchni płytki z powłoką jest nieznaczna, a na powierzchni pierścienia jest prawie czterokrotnie wyższa w stosunku do wartości początkowej). Natomiast w parach smarowanych olejem biodegradowalnym 10W40 i kompozycją oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> pomiary chropowatości powierzchni wykazały wzrost chropowatości pierścienia ulepszanego cieplnie i zmniejszenie chropowatości płytki z powłoką a-C:H:W, przy czym chropowatość powierzchni próbek pierścieniowych smarowanych kompozycją oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> istotnie wzrosła (od 299,5 do 305,3% względem powierzchni przed próbami zużycia) (tabela 5.10).

Zastosowanie powłoki a-C:H:W w styku liniowym pozwala na ograniczenie zapotrzebowania na energię potrzebną do napędu pary ciernej i zwiększa jej trwałość. Możliwym mechanizmem powodującym obniżenie oporów tarcia w parach z powłoką a-C:H:W w porównaniu do par z płytkami handlowymi jest zjawisko grafityzacji powłoki [42, 55]. W warunkach niedostatecznego smarowania powłoka a-C:H:W może tymczasowo przejmować rolę środka smarowego zapobiegając występowaniu tarcia suchego i nie doprowadzić do poważniejszych uszkodzeń elementów węzła tarcia. Istotne obniżenie wartości momentu rozruchowego nie tylko zmniejsza zapotrzebowanie na energię w momencie rozruchu węzła tarcia, ale wskazuje również na tworzenie korzystniejszych warunków tarcia podczas rozruchu w warunkach ograniczonego smarowania [52, 99]. Podobnie jak podczas badań w styku rozłożonym, wyższe wartości współczynnika tarcia w trakcie prób zużycia w styku liniowym

z płytkami utwardzanymi powierzchniowo rejestrowano w parze ciernej smarowanej olejem nowym 5W40 niż olejem zużytym 5W40 i jest to prawdopodobnie spowodowane brakiem lub niepełnym działaniem dodatków w oleju, które aktywowane są w trakcie pracy węzła tarcia, m.in. na skutek działania wysokiej temperatury w obszarach o niedostatecznym smarowaniu [76, 93].

Obniżenie szerokości śladu zużycia płytek zaworowych w parach z płytkami z powłoką a-C:H:W może być następstwem wyeliminowania powinowactwa materiałowego styku stal - stal, ograniczając tym samym podatność elementów tarcia na zużycie adhezyjne i postępujący proces degradacji powierzchni elementów pary ciernej [61]. W przypadku smarowania olejem bazowym PAO8 z dodatkiem dwusiarczku molibdenu zastosowanie płytki zaworowej z powłoką a-C:H:W zapewniło trwałość węzła tarcia w badanych warunkach obciążenia, gdyż zastosowanie w tym układzie tribologicznym płytki utwardzanej powierzchniowo spowodowało zatarcie pary. Wynika z tego, że ten typ oleju bazowego jest kompatybilny z powłoką węglową i może posłużyć do komponowania olejów silnikowych dedykowanych do węzłów tarcia z powłoką a-C:H:W, a zastosowanie tej powłoki umożliwia ograniczenie ilości dodatków uszlachetniających w porównaniu do olejów dedykowanych do stalowych węzłów tarcia [49]. Mniejsze zmiany chropowatości elementów par ciernych w styku liniowym, po próbach zużycia w parach z powłoką a-C:H:W, mogą być wynikiem występowania tak zwanej powłoki transferowej przeniesionej z elementu z powłoką DLC na element współpracujący. Powłoka transferowa chroni wówczas materiał przeciwpróbki przed zużyciem tribologicznym [42, 77].

Badania właściwości przeciwwzrostowych olejów po eksploatacji w styku liniowym wykazały istotne różnice w wartościach obciążenia zacierającego  $P_t$  oraz granicznego nacisku zatarcia  $p_{oz}$  w zależności od rodzaju oleju i temperatury przeprowadzenia próby (rys. 5.34-5.35). Największą odpornością na zacieranie charakteryzuje się olej nowy 5W40 w 40°C i 100°C, ale w 100°C zbliżone wartości zmierzono również dla oleju biodegradowalnego 10W40. Najniższą odporność na zacieranie w 100°C posiada olej zużyty 5W40 i kompozycja oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> (rys. 5.34). Zastosowanie powłoki a-C:H:W w parze ciernej w próbach zużycia w styku liniowym w mniejszym stopniu degraduje olej, co wpływa na wartości obciążenia zacierającego  $P_t$  oleju nowego 5W40 i biodegradowalnego 10W40, które są wyższe od obciążenia olejów zastosowanych w parach z warstwami utwardzanimi powierzchniowo (zmiany te występują zarówno w temperaturze 40°C jak i 100°C

podczas próby zacierania). Olej zużyty 5W40 nie wykazuje istotnej różnicy w wartości obciążenia zacierającego w zależności od ukształtowanej na płytkach zaworowych warstwy powierzchniowej podczas prób zużycia. Istotną zmianę obciążenia zacierającego zarejestrowano dla oleju biodegradowalnego 10W40, w którym olej stosowany w parze ciernej z powłoką a-C:H:W wykazuje większą odporność na zacieranie nie tylko w stosunku do oleju użytego w parze z warstwami powierzchniowymi utwardzonymi, ale również do oleju niestosowanego w parze ciernej podczas prób zużycia. Tego typu zmian obciążenia zacierającego  $P_t$  nie obserwuje się w przypadku innych olejów, w których wartość obciążenia zacierającego oleju niestosowanego w próbach zużycia jest wyższa, a różnica ta wynosi kilka, kilkanaście procent (jedynie kompozycja oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> w temperaturze 100°C wykazuje zbliżoną wartość obciążenia zacierającego dla obu typów olejów) (rys. 5.34).

Obliczony graniczny nacisk zatarcia  $p_{oz}$  wykazał, że olej biodegradowalny 10W40, a następnie olej zużyty 5W40 charakteryzują się dużymi naciskami zatarcia. Graniczne naciski zatarcia wyznaczone dla oleju biodegradowalnego 10W40 są niemal dwukrotnie wyższe niż wyznaczone dla oleju nowego 5W40 i kompozycji oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> (rys. 5.35). Ze względu na dużą niejednorodność wyników obliczeń tego parametru oleju nie można wyznaczyć uogólnionych zależności od temperatury badań oleju, a można jedynie wskazać zmiany dla danego oleju. Olej nowy 5W40 charakteryzują zbliżone wartości nacisku zatarcia dla obu przypadków ukształtowanych warstw powierzchniowych i obu temperatur, w których realizowano próby. Badania oleju biodegradowalnego 10W40 w temperaturze 40°C wykazały wyższe wartości nacisków zatarcia niż w temperaturze 100°C. W temperaturze 40°C olej użyty w parze z powłoką a-C:H:W jest najbardziej odporny na zatarcie, natomiast w temperaturze 100°C najbardziej odporny na zatarcie jest olej nieużywany w próbach zużycia. Olej zużyty 5W40 w temperaturze 40°C, podobnie jak olej biodegradowalny 10W40, jest najbardziej odporny na zatarcie po próbach w parze z powłoką a-C:H:W. Natomiast w temperaturze 100°C obserwuje się istotne obniżenie granicznego nacisku zatarcia oleju nieużywanego w próbach zużycia i oleju użytego w parze z powłoką a-C:H:W, przy istotnym wzroście nacisku zatarcia dla oleju użytego w parze z płytką z warstwami powierzchniowymi utwardzonymi. Kompozycja oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> wykazuje nieznaczny spadek granicznych nacisków zatarcia wraz ze wzrostem temperatury prób oraz niewiele wyższy nacisk zatarcia oleju nieużywanego w próbach zużycia (olej stosowany w parach z płytką z warstwami powierzchniowymi

utwardzonymi nie został poddany analizie, ze względu na zatarcie się pary w badaniach zużycia przed wymaganym czasem trwania prób).

Obserwacja obszaru zużycia kulek badawczych wykazała, że oleje 5W40 i olej biodegradowalny 10W40 generują głównie procesy zużycia ściernego spowodowane bezpośrednim kontaktem warstw powierzchniowych kulek, co powoduje występowanie bruzd, rys i wyrwań na krawędzi śladu zużycia. Zastosowanie kompozycji smarowej oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> powoduje intensywne procesy zużycia prowadzące do zgrzania kulek. W śladzie zużycia występują obszary płynięcia materiału, a także powstają zgrzeiny, które są następnie rozrywane po zakończeniu próby. Te niekorzystne procesy w obecności oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> występują, gdy na współpracujących warstwach powierzchniowych w procesie tarcia nie ma warunków do wytworzenia warstwy granicznej, a w przypadku oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> do jej wytworzenia niezbędna jest adsorpcja fizyczna i chemisorpcja, wywołana reakcją chemiczną jonów siarki z atomami metalu [75, 76].

Wpływ eksploatacji par ciernych z elementami pokrytymi powłoką a-C:H:W w styku liniowym na właściwości przeciwzatarciowe środków smarowych nie jest jednoznaczny. Badania olejów wykazały zmiany w wartościach obciążenia zacierającego  $P_t$  oraz granicznych nacisków zatarcia  $p_{oz}$ . Przeprowadzone próby wykazały konieczność starannego doboru środków smarowych do współpracy z powłokami typu a-C:H:W w styku liniowym. Przykładem są pary cierne smarowane olejem biodegradowalnym 10W40, w których poprawa parametrów tarcia występuje w ograniczonym zakresie obciążeń węzła tarcia, po przekroczeniu którego zwiększa się intensywność zużycia płytki zaworowej (rys. 5.25) i olej bazowy PAO8 z dodatkiem MoS<sub>2</sub>, który nie zapewnił ochrony węzła z płytkami utwardzonymi powierzchniowo przed zatarciem [17, 50] (rys. 5.26). Eksploatacja węzłów tarcia z elementami pokrytymi powłokami DLC wymaga także zapewnienia skutecznej ochrony przed przedostawaniem się zanieczyszczeń w obszar tarcia. Obecność twardych zanieczyszczeń może powodować wykruszanie powłoki, powodując tym samym poważniejsze uszkodzenia powierzchni współpracujących elementów w porównaniu do uszkodzeń elementów bez powłoki węglowej [97]. Natomiast olej 5W40 eksploatowany w silniku spalinowym zmienił swoje właściwości użytkowe, m.in. na skutek przedostawania się paliwa i gazów spalinowych z komory spalania do miski olejowej poprzez nieszczelności pierścieni tłokowych, kumulowania zanieczyszczeń będących efektem działania dodatków myjąco - dyspergujących oraz produktów zużycia par

ciernych silnika [100, 101]. Zmiany te mogą powodować obniżenie obciążenia zacierającego oleju zużytego 5W40, gdyż olej nowy 5W40 umożliwia tworzenie trwalszej warstwy granicznej, chroniącej elementy wężła tarcia przed rozpoczęciem procesu zacierania (rys. 5.30). Odwrotna zależność występuje w przypadku badań odporności na zatarcie wężła ciernego. Obliczone wartości granicznego nacisku zatarcia  $p_{oz}$  są wyższe w przypadku smarowania skojarzenia ciernego olejem zużytym 5W40 (rys. 5.31). Dodatki uszlachetniające w oleju silnikowym, m.in. dodatki przeciwzużyciowe i przeciwzatarciowe są aktywowane w trakcie pracy w silniku spalinowym na skutek zachodzących w oleju reakcji chemicznych w wyniku procesów tribochemicznych, co może tłumaczyć zwiększenie wartości granicznego nacisku zatarcia oleju zużytego w porównaniu do oleju nowego [102], dodatkowo występujące procesy utleniania podczas eksploatacji oleju w silniku generują powierzchniowo czynne zanieczyszczenia organiczne, tworzące na powierzchni metali warstwę graniczną, poprawiającą właściwości smarne oleju silnikowego [103].

## 7. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych prac badawczych i analizy wyników sformułowano następujące wnioski poznawcze:

1. Ustalono, że zmiany struktury geometrycznej elementów węzłów ciernych mają tendencję kształtowania wymaganej chropowatości powierzchni do warunków obciążenia. Zastosowanie w styku konforemnym powłoki a-C:H:W powoduje istotny wzrost chropowatości powierzchni przeciwpróbki ze stopu łożyskowego CuPb30 w porównaniu do warstwy powierzchniowej ulepszanej cieplnie, jednak smarowanie kompozycją oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> zmniejsza chropowatość powierzchni przy wyższych naciskach jednostkowych 15 i 20 MPa. Natomiast w styku konforemnym zastosowanie warstwy utwardzonej powierzchniowo generuje wzrost chropowatości powierzchni stalowej próbki pierścieniowej. Przy smarowaniu kompozycją oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> warstwa utwardzana powierzchniowo spowodowała wzrost chropowatości powierzchni próbki pierścieniowej od 140 do 294% względem nowej próbki. Powłoka a-C:H:W powoduje wzrost chropowatości powierzchni pierścienia ulepszanego cieplnie od 215 do 305% przy smarowaniu kompozycją oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> w porównaniu do nowego pierścienia.
2. Ukształtowana warstwa powierzchniowa z powłoką a-C:H:W w parze z przeciwpróbkami ze stopu CuPb30 powoduje znaczny wzrost momentu rozruchowego w porównaniu do warstwy powierzchniowej ulepszanej cieplnie, szczególnie przy smarowaniu olejami 5W40 (maksymalnie 43% przy nacisku jednostkowym 5 MPa), zaś w styku liniowym powłoka a-C:H:W obniża moment rozruchowy w porównaniu do par ciernych z płytkami handlowymi utwardzonymi powierzchniowo przy smarowaniu olejem biodegradowalnym 10W40 i kompozycją oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub>.
3. Zarejestrowane przebiegi współczynnika tarcia w parach o styku konforemnym z warstwami powierzchniowymi ulepszanymi cieplnie i smarowanych olejami handlowymi wykazują duże podobieństwo, zaś kompozycja oleju bazowego PAO8 + MoS<sub>2</sub> wykazuje stabilizację na znacznie wyższym poziomie wartości. Natomiast w parach ciernych z powłoką a-C:H:W i smarowaniu kompozycją oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> występuje najniższy współczynnik tarcia po ustabilizowaniu procesów tarcia, podczas gdy pozostałe oleje generują wzrost współczynnika tarcia wraz z upływem czasu próby.



4. Nie stwierdzono jednoznacznego wpływu stanu zużycia oleju 5W40 w styku konforemnym na tendencje zmian w oporze ruchu, temperaturze w obszarze tarcia i zużyciu przeciwpróbki ze stopu łożyskowego CuPb30. Jednak dla obu ukształtowanych warstw powierzchniowych moment tarcia, temperatura i zużycie są znacząco większe w parach z powłoką a-C:H:W dla obu badanych olejów. Natomiast w styku liniowym w parach smarowanych olejem użytym 5W40 występuje większe zużycie powłoki a-C:H:W, przy porównywalnych wartościach zużycia warstwy utwardzanej powierzchniowo (niemniej jednak przy sile nacisku 3000 N wzrost szerokości śladu zużycia wynosi 14,5%) i porównywalnych wartościach oporów tarcia i temperatury w styku smarowanym dla obu badanych olejów.
5. Użycie do smarowania oleju biodegradowalnego 10W40 w styku rozłożonym pary z powłoką a-C:H:W spowodowało znaczący wzrost zużycia masowego stopu łożyskowego CuPb30 (27-krotny) przy istotnym wzroście oporów ruchu (17-krotny) i temperatury (dwukrotny) w obszarze tarcia w porównaniu do pary z powierzchnią ulepszaną cieplnie, zaś w styku liniowym nieznacznie większe zużycie powłoki a-C:H:W przy niższych oporach tarcia (maksymalnie 28,5%) i niższej temperaturze (maksymalnie 19,2%) w obszarze tarcia w porównaniu do warstwy utwardzanej powierzchniowo.
6. Stwierdzono, że kompozycja oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub> wprowadzona w obszar tarcia w styku konforemnym pary z powłoką a-C:H:W spowodowała istotne różnice w zużyciu stopu łożyskowego CuPb30 (46-krotny wzrost), momencie tarcia (pięciokrotny wzrost) i temperaturze w obszarze tarcia (dwukrotny wzrost), w porównaniu do pary z powierzchnią ulepszaną cieplnie, natomiast w styku niekonforemnym ze względu na zatarcie pary z komercyjną płytką zaworową nie można przeprowadzić porównania.
7. Zwiększone opory tarcia w parach ciernych z powłoką a-C:H:W powodują mierzalny wzrost temperatur w obszarze tarcia, największy wzrost zarejestrowano podczas smarowania obszaru tarcia olejem biodegradowalnym 10W40 (wzrost o 43,3°C przy nacisku jednostkowym 20 MPa), a najniższy podczas smarowania olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub> (wzrost o 3,1°C przy nacisku 20 MPa). Spadek temperatury rzędu 5,3% zarejestrowano tylko w parach smarowanych olejem PAO8 + MoS<sub>2</sub> i nacisku jednostkowym 10 MPa.
8. Zaobserwowano, że zastosowanie powłoki a-C:H:W w parze ciernej powoduje intensywne zużycie masowe materiału łożyskowego CuPb30, które jest wielokrotnie

wyższe od zużycia stopu w skojarzeniu z powierzchnią ulepszoną cieplnie: olej nowy 5W40 – wzrost 11-krotny, olej zużyty 5W40 – wzrost 7-krotny, olej biodegradowalny 10W40 – wzrost 27-krotny i kompozycja olejowa PAO8 + MoS<sub>2</sub> – wzrost 46-krotny (przy naciskach jednostkowych 15 MPa).

9. Ustalono, że powłoka a-C:H:W w większości badanych skojarzeń w styku liniowym została w mniejszym stopniu zniszczona niż warstwa utwardzana powierzchniowo (płytki komercyjne). Jest to szczególnie wyraźne podczas smarowania obszaru tarcia kompozycją oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub>, w której ślady zużycia na płytkach utwardzanych powierzchniowo, które uległy przedwczesnemu zatarciu są większe o 16,5 i 26,2% w porównaniu do śladów zużycia płytek z powłoką, które przepracowały zakładany czas próby.
10. Stwierdzono, że wzrost temperatury oleju ma istotny wpływ na spadek obciążenia zacierającego środków smarowych, przy czym najbardziej odporny na zacieranie jest olej nowy 5W40 i kolejno: olej biodegradowalny 10W40, olej zużyty 5W40 i kompozycja oleju PAO8 + MoS<sub>2</sub>, a przy tym olej zużyty 5W40 eksploatowany w silniku spalinowym powoduje zacieranie wężła tarcia przy niższych wartościach obciążenia niż olej nowy 5W40 o 28,5% w temperaturze 40°C i o 23,9% w temperaturze 100°C.
11. Obliczenia granicznego nacisku zatarcia wykazują, że najwyższa odporność na zatarcie wężła ciernego występuje podczas smarowania olejem biodegradowalnym 10W40, następnie olejem 5W40 po eksploatacji w silniku spalinowym, zaś najniższą odporność wykazuje olej nowy 5W40 i kompozycja oleju bazowego PAO8 + MoS<sub>2</sub>, przy czym nie obserwuje się istotnego wpływu temperatury na wartość granicznego nacisku zatarcia (zbliżone lub nieznacznie niższe wartości granicznego nacisku zatarcia). Ostatecznie smarowanie czterokulowego wężła tarcia kompozycją oleju bazowego PAO8 + MoS<sub>2</sub> spowodowało jego zatarcie.

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski praktyczne:

1. Warstwa powierzchniowa ulepszana cieplnie ukształtowana na próbkach pierścieniowych nie wykazała mierzalnego zużycia tribologicznego podczas badań zarówno w skojarzeniu o styku konforemnym jak i niekonforemnym.
2. Powłoka a-C:H:W ukształtowana na płytkach zaworowych pracujących w styku liniowym w obecności badanych środków smarowych powoduje zmniejszenie

oporów tarcia i tym samym zmniejszenie zapotrzebowania energetycznego węzła tarcia.

3. Ukształtowana powłoka a-C:H:W w skojarzeniach ze stopem łożyskowym CuPb30 powoduje jego przyspieszone zużycie, co może prowadzić do katastroficznego zniszczenia węzła tarcia, a produkty zużycia mogą powodować także przyspieszone zużycie innych węzłów tarcia w wyniku kontaktu z zanieczyszczonym środkiem smarowym.
4. Eksploatacja oleju 5W40 w silniku spalinowym na dystansie 5000 km spowodowała zauważalne, zazwyczaj niekorzystne zmiany w parametrach współpracy badanych par ciernych, w porównaniu do smarowania pary olejem nowym 5W40.
5. Dobór olejów do smarowania węzłów tarcia z powłoką a-C:H:W występujących w silniku spalinowym wymaga znajomości kompozycji materiałowej pracujących węzłów, gdyż przy niekorzystnych warunkach smarowania może ostatecznie wystąpić ich zatarcie (zatarcie węzła tarcia z pierścieniem ulepszanym cieplnie i płytką zaworową utwardzaną powierzchniowo przy smarowaniu kompozycją oleju bazowego PAO8 + MoS<sub>2</sub>).

### **7.1. Proponowane kierunki dalszych prac badawczych**

Wyniki uzyskane podczas porównawczych badań stanowiskowych pozwoliły osiągnąć założone cele użytkowe i praktyczne. Jednak specyfika procesów tarcia i zużycia wyznacza jeszcze inne obszary wymagające dalszych badań w celu uzyskania pełniejszego obrazu procesów i zjawisk przebiegających w węzłach ciernych z powłoką a-C:H:W w skojarzeniu z olejami silnikowymi. Istotne jest uwzględnienie w dalszych badaniach takich następujących kierunków prac jak:

- badanie powłoki a-C:H:W z innymi materiałami konstrukcyjnymi stosowanymi w węzłach ciernych silników spalinowych,
- badanie powłoki a-C:H:W z innymi środkami smarowymi stosowanymi w węzłach ciernych silników spalinowych,
- zastosowanie nowych dodatków przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych w środkach smarowych, zmniejszających zużycie materiałów i energii oraz o mniejszej szkodliwości dla środowiska naturalnego,
- poznanie mechanizmów wspólnego oddziaływania materiałów budujących węzeł cierny poprzez badanie produktów zużycia oraz identyfikację związków chemicznych powstających w obszarze tarcia w wyniku reakcji tribochemicznych,

- badanie oddziaływania powłoki a-C:H:W ukształtowanej innymi technologiami niż PVD lub z użyciem odmiennych parametrów procesu technologicznego wytwarzania powłoki w skojarzeniach ciernych silników spalinowych pracujących w warunkach ograniczonego smarowania,
- analiza obszarów zużycia za pomocą mikroskopii skaningowej SEM/EDS celem obserwacji obszarów przenoszenia materiałów i określenia związków chemicznych powstałych w wyniku oddziaływań zachodzących pomiędzy kompozycją smarową, a materiałami pary ciekiej,
- użycie węzłów ciernych z powłoką a-C:H:W w silnikach spalinowych w warunkach dynamicznych i kinematycznych warunków eksploatacji.

## LITERATURA

- [1] Bewilogua K., Hofmann D.: History of diamond-like carbon films — from first experiments to worldwide applications. *Surface Coating Technology* 2014, vol. 24. p. 214–225.
- [2] Steiner J., Andreas K., Merklein M.: Investigation of surface finishing of carbon based coated tools for dry deep drawing of aluminium alloys. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 2016, vol. 159, pp. 012022.
- [3] Madej M., Ozimina D.: Właściwości tribologiczne powłok DLC. *Tribologia* 2012, nr 3, s. 95-102.
- [4] Tyagi A., Walia R., Murtaza Q., Pandey S., Pawan K. Tyagi P., Bajaj B.: A critical review of diamond like carbon coating for wear resistance applications. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 2019, 78 p. 107–122.
- [5] Gies A., Chudoba T, Schwarzer V. N, Becker J.: Influence of the coating structure of a-C:H:W coatings on their wear-performance: A theoretical approach and its practical confirmation. *Surface & Coatings Technology* 2013, vol. 237, pp. 299–304.
- [6] Weber M., Bewilogua K., Thomsen H., Wittorf R.: Influence of different interlayers and bias voltage on the properties of a-C:H and a-C:H:Me coatings prepared by reactive d.c. magnetron sputtering. *Surface & Coatings Technology* 2006, vol. 201, pp. 1576–1582.
- [7] OC Oerlikon Balzers AG: Coated Components. Greater Performance and reliability, 2010.
- [8] Barriga J., Kalin M., Van Acker K., Vercammen K., Ortega A., Leiaristi L.: Tribological characterization and validation of carbon based coatings combined with bio-lubricants. *Nordtrib. 11th Nordic Symposium on Tribology, Hurtigruten*, 2004, pp. 508–517.
- [9] Figura R., Sadowski S., Religa P.: Poprawa sprawności energetycznej silnika spalinowego zasilanego paliwem gazowym. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* 2018, nr 12, s. 403-406.
- [10] Cyriac F., Yi T., Poornachary S., Chow P.: Behavior and interaction of boundary lubricating additives on steel and DLC-coated steel surfaces. *Tribology International* 2021, vol. 164, 107199.

- [11] Lawrowski Z.: Technika smarowania. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996.
- [12] Płaza S., Margielewski L., Celichowski G.: Wstęp do tribologii i tribochemia. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2005.
- [13] Jaźwiński J., Ważyńska-Fiok K.: Niezawodność systemów technicznych. PWN, Warszawa 1990.
- [14] Tylicki H., Żółtowski B.: Genezowanie stanu maszyn. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB. Radom 2012.
- [15] Lawrowski Z.: Tribologia. Tarcie, zużywanie i smarowanie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
- [16] Lubas J. Zastosowanie warstw powierzchniowych z borem w smarowanych węzłach ciernych silnika spalinowego. Wydawnictwo Uniwersytetu Rzeszowskiego, Rzeszów 2013.
- [17] Grądkowski M., Matuszewska A.: Olej smarowy do węzłów tarcia z powłoka niskotarciową WC/C. Problemy Eksploatacji 2007, nr. 4, s. 119-132.
- [18] Ambrozik A., Jakóbiec J., Wysopal G.: Podstawowe kierunki zmian olejów silnikowych. Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe 2011, nr 12, s. 51-56.
- [19] Jakóbiec J., Wądrzyk M., Janus R., Stanik W.: Kierunki rozwoju olejów silnikowych pojazdów samochodowych w zakresie ochrony środowiska. Logistyka 2015, nr 5, s. 155-160.
- [20] Idzior M., Wichtowska K.: Badanie wpływu przebiegu pojazdów na zmiany właściwości olejów silnikowych. Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe 2016, nr 6, s. 900-904.
- [21] API: API 1509, Engine Oil Licensing and Certification System, 21th Edition. 2022.
- [22] Beran E.: Wpływ budowy chemicznej bazowych olejów smarowych na ich biodegradowalność i wybrane właściwości eksploatacyjne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
- [23] Podniało A.: Oleje i smary w technice smarowania maszyn i pojazdów samochodowych. Wydawnictwo RB, Opole 2012.
- [24] Piec P.: Diagnostyka intensywności zużycia oleju silnikowego w czasie eksploatacji. Tribologia 2012, nr 6, s. 139-145.

- [25] SAE International: SAE J300\_202104: Engine Oil Viscosity Classification. Warrendale 2021.
- [26] ACEA: ACEA European Oil Sequences. General Requirements. Service Fill Engine Oils for Gasoline & Light-Duty Diesel Engines and Heavy-Duty Diesel Engines. Bruksela 2021.
- [27] ACEA: ACEA European Oil Sequences for Light-Duty Engines. Service Fill Engine Oils for Gasoline & Light Duty Diesel Engines (A/B Categories), Gasoline & Light-Duty Diesel Engines with Exhaust Aftertreatment Devices (C Categories). Bruksela 2021.
- [28] ACEA: ACEA European Oil Sequences for Heavy Duty Engines. Service Fill Engine Oils. Heavy Duty Diesel Engines (E Categories). Bruksela 2016.
- [29] Zajezińska A., Ptak S.: Badania biodegradowalności smarów plastycznych. Nafta-Gaz 2015, nr 10, s. 793-799.
- [30] Małachowska-Jutysz A., W. Janosz, J. Rudek.: Toksyczność gleby zanieczyszczonej olejem silnikowym poddanej samooczyszczaniu oraz fitoremediacji. Ochrona Środowiska 2012 34(1), s. 15-20.
- [31] Nowak P., Kucharska K., Kamiński M.: Metody kontroli olejów smarowych emitowanych do środowiska. XIV Konferencja Dla miasta i środowiska – Problemy Unieszkodliwiania Odpadów. Warszawa, 26.11.2018.
- [32] OECD: Test No. 301: Ready Biodegradability, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3, OECD Publishing, Paryż, 1992.
- [33] OECD: Test No. 310: Ready Biodegradability - CO<sub>2</sub> in sealed vessels (Headspace Test), OECD Publishing, Paryż, 2006.
- [34] OECD: Test No. 302A: Inherent Biodegradability: Modified SCAS Test, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3, OECD Publishing, Paryż, 1981.
- [35] OECD: Test No. 302B: Inherent Biodegradability: Zahn-Wellens/ EVPA Test, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3, OECD Publishing, Paryż, 1992.
- [36] OECD: Test No. 302C: Inherent Biodegradability: Modified MITI Test (II), OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3, OECD Publishing, Paryż, 2009.

- [37] Urzędowska W., Stępień Z.: Wybrane zagadnienia dotyczące zmian właściwości silnikowego oleju smarowego w eksploatacji. *Nafta-Gaz* 2012, nr 12, s. 1102-1110.
- [38] Bobzin K., Brogelmann T.: Minimizing Frictional Losses in Crankshaft Bearings of Automobile Powertrain by Diamond-like Carbon Coatings under Elastohydrodynamic Lubrication. *Surface & Coatings Technology* 2016, vol. 290, pp. 100–109.
- [39] Dobrzański L., Dobrzańska-Danikiewicz A.: Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich. *Open Access Library*, vol. 5, 2011.
- [40] Burakowski T., Wierzchoń T.: *Inżynieria powierzchni metali*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995.
- [41] Michalczewski R.: Przebieg procesu zacierania smarowanych wysokoobciążonych skojarzeń ciernych z elementami pokrytymi powłoką WC/C. *Tribologia* 2011, nr 3, s. 81–104.
- [42] Hauert R.: An overview on the tribological behavior of diamond-like carbon in technical and medical applications. *Tribology International* 2004, vol 37, p. 991-1003.
- [43] Robertson J., Comparison of diamond-like carbon to diamond for applications. *Physica Status Solidi (A)* 2008, 205 no. 9: 2233-2244.
- [44] Kano M.: Diamond-Like Carbon Coating Applied to Automotive Engine Components. *Tribology Online* 2014, 9, 3, 135-142.
- [45] M. T. Hanif, R. Zahid, R. Mufti, M. Waqas, T. Naveed. A Review on Tribological Study of DLC Coatings in Combination with Bio Based Lubricants. *International Journal of Materials Science and Applications* 2021, Vol. 10, No. 3, p. 61-78.
- [46] Kano M.: Super low friction of DLC applied to engine cam follower lubricated with ester-containing oil. *Tribology International* 2006, 39(12), 1682–1685.
- [47] Karczewski M., Szczęch L.: Pomiar oporów wewnętrznych silnika spalinowego. *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej* 2013, nr 2 (193), s. 39-47.
- [48] Ogihara H., Mihara Y., Kano M.: Seizure and Friction Properties of the DLC Coated Journal and Aluminum Alloy Bearing. *Tribology Online* 2020, 15, 241-250.
- [49] Kalbarczyk M., Michalczewski R., Piekoszewski W., Szczerek M.: The influence of oils on the scuffing of concentrated friction joints with low-friction coated



- elements. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and reliability* 2013, 15 (4): 319–324.
- [50] Piekoszewski W., Szczerek M.: Zacieranie i pitting stalowego wężła tarcia tarcia z elementami pokrytymi powłokami niskotarciowymi nanoszonymi metodami PVD. *Tribologia* 2015, nr 3, s. 137-152.
- [51] Tasdenir H., Tokoroyama T., Kousaka H., Umehara N., Mabuchi Y.: Friction and wear performance of boundary-lubricated DLC/DLC contacts in synthetic base oil. *Procedia Engineering* 2013, vol. 68 p. 518–524.
- [52] Madej M., Ozimina D., Pająk M.: Właściwości powłok węglowych uzyskiwanych w procesach fizycznego osadzania z fazy gazowej. *Mechanik* 2015, nr 4, s. 151-156.
- [53] Ozimina D., Madej M., Kowalczyk J., Suchanek J., Taticzek F., Kolariikova M.: Zużycie powłok diamentopodobnych w zależności od rodzaju kompozycji powłokowej i materiałów pary trącej. *Tribologia* 2012, nr 3, s. 127-136.
- [54] Dobrenizki L., Tremmel S., Wartzack S., Hoffmann D., Brögelmann T., Bobzin K., Bagcivan N., Musayev Y., Hosenfeldt T.: Efficiency improvement in automobile bucket tappet/camshaft contacts by DLC coatings – Influence of engine oil, temperature and camshaft speed. *Surface & Coatings Technology* 2016, vol 308, p. 360-373.
- [55] Mustafa M., Umehara N., Tokoroyama T., Murashima M., Shibata A., Utsumi Y., Moriguchi H.: Effect of mesh structure of tetrahedral amorphous carbon (ta-C) coating on friction and wear properties under base-oil lubrication condition. *Tribology International* 2020. Vol. 147, p. 105557.
- [56] Krzan B., Novotny-Farkas F., Vizintin J.: Tribological behavior of tungsten-doped DLC coating under oil lubrication. *Tribology International* 2004, vol. 42, pp. 229–235.
- [57] Tasdemir H., Wakayama M., Tokoroyama T., Kousaka H., Umehara N., Mabuchi Y., Higuchi T.: Ultra-low friction of tetrahedral amorphous diamond-like carbon (ta-C DLC) under boundary lubrication in poly alpha-olefin (PAO) with additives. *Tribology International* 2013, vol. 65, pp. 286–294.
- [58] Kowalczyk J., Kulczycki A., Madej M., Ozimina D.: Effect of ZDDP and fullerenes added to PAO8 lubricant on tribological properties of the surface layer of steel bare steel and W-DLC coating. *Tribologia* 2022, nr 1, s. 19-32.

- [59] Tillmann W., Wittig A., Dias N., Stangier D., Thomann C., Moldenhauer H., Debus J.: Silicon- and tungsten-containing hydrogen-free and hydrogenated amorphous carbon films for friction-reducing applications. *Diamond & Related Materials* 2022, vol. 123, 108866.
- [60] Iwata T., Oikawa M., Chida R., Ishii D., Ogihara H., Mihara Y., Kano M.: Excellent Seizure and Friction Properties Achieved with a Combination of an a-C:H:Si DLC-Coated Journal and an Aluminum Alloy Plain Bearing. *Coatings* 2021, 11 1055.
- [61] Madej M., Ozimina D.: Właściwości tribologiczne powłok diamentopodobnych smarowanych cieczami jonowymi. *Tribologia* 2014, nr 4, s. 73-84.
- [62] Milewski K., Madej M., Ozimina D.: Tribological properties of Diamond-Like Carbon coatings at friction joints lubricated with ionic liquid. *Tribologia* 2019, nr 5, s. 59-69.
- [63] Michalczewski R.: Wpływ konfiguracji materiałowej na odporność na zacieranie smarowanych skojarzeń z elementami pokrytymi powłoką niskotarciową. *Tribologia* 2009, nr 2, s. 93–106.
- [64] Ozimina D., Madej M.: Ocena właściwości jedno- i wielowarstwowych powłok DLC. *Tribologia* 2010, nr 2, s. 119-135.
- [65] Madej M.: The effect of TiN and CrN interlayers on the tribological behavior of DLC coatings. *Wear* 2014, vol. 317, p 179-187.
- [66] Al Mahmud K. A. H., Varman M, Kalam M. A., Masjuki H. H., Mobarak H. M., Zulkifli N. W. M.: Tribological characteristics of amorphous hydrogenated (a-C: H) and tetrahedral (ta-C) diamond-like carbon coating at different test temperatures in the presence of commercial lubricating oil. *Surface Coating Technology* 2014, vol. 245, pp. 133–147.
- [67] Horiuchi T., Yoshida K., Kano M., Kumagai M., Suzuki T.: Evaluation of Adhesion and Wear Resistance of DLC Films Deposited by Various Methods. *Plasma Processes and Polymers* 2009, 6, 2009, 6, 410-416.
- [68] Bernardes C., Fukumasu N., Lima A., Souza R., Machado I.: Influence of growth defects on the running-in behavior of an a-C:H:W coating under pure sliding contact conditions. *Surface & Coatings Technology* 2020, vol 402, p. 126278
- [69] Ronkainen H., Holmberg K., Laukkanen A., Andersson T., Kano M., Horiuchi T., Suzuki T.: The effect of coating properties on the performance of a-C:H and ta-C films. *Tribologia – Finnish Journal of Tribology* 2012, 3-4 vol 31, 3-10.

- [70] Kot M., Zimowski S., Major Ł., Chronowska-Przywara K., Rakowski W.: Tribologia powłok węglowych w podwyższonej temperaturze. *Tribologia* 2015, nr 3, s. 55-64.
- [71] Tokar D., Radek N., Sęk P., Mikina A., Kalinowski A.: Właściwości powłok DLC teksturowanych laserowo. *Wybrana Problematyka w Technologiach Inżynierii Mechanicznej M135*, s. 35-44. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2020.
- [72] Zahid R., Bhutta M. U., Mufti R. A., Abdullah M. U., Masjuki H. H., Varman M., Kalam M. A., Ali M.A., Aslam J., Akhtar K.: Friction and Wear Performance Evaluation of Bio-Lubricants and DLC Coatings on Cam/Tappet Interface of Internal Combustion Engines. *Materials* 2021, 14, 7206.
- [73] Grądkowski M., Bednarska A., Dziosa K.: Properties of lubricants designed for WC/C-coated elements of tribosystems. *Problemy eksploatacji – Maintenance problems* 2013, 3, s. 55–62.
- [74] Walczak M., Caban J.: Wpływ dodatku modyfikatora opartego na składniku MoS<sub>2</sub> na charakterystykę tribologiczną stopu AlSi6Cu4 w środowisku oleju mineralnego. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* 2016, nr 6, s. 1393-1196.
- [75] Młynarczak A.: Preparaty eksploatacyjne stosowane w olejach smarowych. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*, 2010 nr 64, s. 69-76.
- [76] Laber A.: Modyfikowanie własności warstwy granicznej preparatami eksploatacyjnymi na bazie środków smarnych anizotropowych. *Tribologia* 2010, nr 5, s. 107-116.
- [77] Zhang Y., Li P., Ji L., Liu X., Wan H., Chen L., Li H., Jin Z.: Tribological properties of MoS<sub>2</sub> coating for ultra-long wear-life and low coefficient of friction combined with additive g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> in air. *Friction* 2021, 9(4): 789-801
- [78] Dziosa K.: Właściwości smarne oleju z alg w skojarzeniu stal-stal. *Tribologia* 2013, nr 5, s. 21-31.
- [79] Dziosa K., Makowska M., Grądkowski M.: Właściwości tribologiczne elementów pokrytych powłokami WC/C smarowanych podczas tarcia olejem z alg. *Tribologia* 2014, nr 6, s. 23-31.
- [80] Hadło K., Lubas J.: Tribological properties of the friction pair with a-C:H coating under the conditions of lubrication with 10W40 biodegradable engine oil. *Tribologia* 2022, nr 2, s. 15-22.

- [81] PN-EN ISO 683-2:2018-08. Stale do obróbki cieplnej, stale stopowe i stale automatowe -- Część 2: Stale stopowe do hartowania i odpuszczania.
- [82] Hadło K., Lubas J.: Wpływ użycia poeksploatacyjnego oleju silnikowego na parametry rozruchowe smarowanego wężła ciernego. Systemy i środki transportu samochodowego. Badania i technologia silników spalinowych - wybrane zagadnienia, Nr 17, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2019, s. 15-24.
- [83] VW AG: Karta charakterystyki Olej silnikowy (MOTOROEL) G 052167M2; M4; M6, 2011.
- [84] PANOLIN International Inc.: Karta informacyjna BIOMOT LX 10W/40, 2015.
- [85] Szczypiński-Sala W., Tomala A., Lubas J.: Tribological properties of a rubber seal under operation with oil containing MoS<sub>2</sub> nanoparticles. Tribologia 2019, nr 4, s. 95-103.
- [86] Laber S.: Ocena właściwości tribologicznych powłok uzyskanych drogą metalizacji natryskowej. Tribologia 2012, nr 4, s. 117-124.
- [87] Instrukcja obsługi testera T-05 typu rolka-klocek, ITEe, Radom 1995.
- [88] T-02U. Aparat czterokulowy – instrukcja obsługi. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji. Radom 2011.
- [89] PN-EN ISO 683-17:2015-01. Stale do obróbki cieplnej, stale stopowe i stale automatowe -- Część 17: Stale na łożyska kulkowe i wałeczkowe.
- [90] Polański Z.: Współczesne metody badań doświadczalnych. PWN, Poznań 1978.
- [91] Szczerek M.: Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. ITE, Radom 1997.
- [92] Akchurin A., Bosman R., Lugt P., Drogen M.: Analysis of wear particles formed in boundary-lubricated sliding contacts. Tribology Letter 2016, vol. 63, pp. 16.
- [93] Niewczas A., Wrona J., Wrona R.: Zanieczyszczenia oleju smarującego oraz ich wpływ na trwałość silnika spalinowego. Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe 2010, nr 6, s. 1-5.
- [94] Malinowska M.: Analiza zanieczyszczeń oleju silnikowego stosowanego w silniku Cegielski-Sulzer 3AL25/30. Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, 2014 nr 83, s. 194-202.
- [95] Schouwenaars R. Jacobo V. H.; Ortiz A.: Microstructure aspect of wear in soft tribological alloys. Wear 2007, vol. 263, pp. 727-735.

- [96] Dudek K., Szczypinski-Sala W., Lubas J.: Influence of laser boriding on the friction and wear of sliding couples with bearing alloys. *Surface Review and Letter* 2020, vol. 27, p. 1950084.
- [97] He F., Wong P. L., Zhou X.: Wear properties of DLC-coated steel rollers running with highly contaminated lubrication. *Tribology International* 2010, vol. 43, pp 990-996.
- [98] Nehme G., Mourhatch R., Aswath P.: Effect of contact load and lubricant volume on the properties of tribofilms formed under boundary lubrication in a fully formulated oil under extreme load conditions. *Wear* 2010, vol. 268, pp. 1129-1147.
- [99] Lubas J.: Właściwości tribologiczne węzłów ślizgowych zawierających elementy z warstwami powierzchniowymi modyfikowanymi borem. *Archiwum Motoryzacji* 2009, nr 4, pp. 297-305.
- [100] Urzędowska W., Stępień Z.: Oddziaływanie paliwa na zmiany właściwości użytkowych oleju smarowego w silniku z ZI typu FlexFuel. *Nafta-Gaz* 2012, nr 6, s. 378-387.
- [101] Krupowies J.: Analiza zmian właściwości użytkowych olejów smarowych firmy BP w czasie ich eksploatacji. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie* 2006, nr 10 (82), s. 309-318.
- [102] Malinowska M., Zera D.: Analiza zmian smarności oleju silnikowego stosowanego w silniku Cegielski-Sulzer 3AL25/30. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*, 2016 nr 96, s. 93-104.
- [103] Młynarczak A.: Charakterystyki tribologiczne oleju smarowego eksploatowanego w silniku okrętowym. *Tribologia* 2014, nr 3, s. 143-151.

## STRESZCZENIE

W niniejszej pracy omówiono aktualny problem badawczy obejmujący wpływ powłoki a-C:H:W ukształtowanej na elementach węzłów ciernych o styku konforemnym i niekonforemnym oraz środka smarowego (syntetycznych olejów silnikowych) na właściwości tribologiczne węzłów ciernych w warunkach ograniczonego smarowania.

Analiza stanu zagadnienia obejmuje informacje na temat procesów tarcia i zużycia zachodzących w węzłach ciernych, klasyfikacji i charakterystyki olejów silnikowych, metod wytwarzania warstw powierzchniowych oraz właściwości tribologicznych powłok na bazie amorficznego węgla, w tym powłok typu a-C:H:W.

Przeprowadzone badania par ciernych w warunkach ograniczonego smarowania pozwoliły na ocenę wpływu zastosowania powłoki a-C:H:W ukształtowanej na elementach węzła ciernego oraz syntetycznych olejów smarowych na procesy tribologiczne zachodzące w skojarzeniach ciernych w styku rozłożonym i liniowym. W pracy wykazano, że zastosowanie próbek pierścieniowych z powłoką a-C:H:W w styku rozłożonym z przeciwpróbkami ze stopu łożyskowego CuPb30 generuje warunki tarcia utrudniające powstanie stabilnych warunków współpracy. Pary cierne smarowane badanymi olejami wykazują wyższe wartości parametrów tarcia oraz zwiększone zużycie przeciwpróbek ze stopu łożyskowego CuPb30, w porównaniu do par ciernych z próbkami z warstwą powierzchniową ulepszoną cieplnie. Badania par ciernych w styku liniowym z płytkami zaworowymi z powłoką a-C:H:W w warunkach smarowania badanymi olejami wskazują na tworzenie się warunków współpracy, które powodują obniżenie oporów ruchu, temperatury w obszarze tarcia oraz stopnia zużycia w porównaniu do par w których zastosowano komercyjne płytki zaworowe utwardzane powierzchniowo. Dodatkowo, dokonano oceny właściwości przeciwtarciowych - obciążenia zacierającego oraz granicznego nacisku zatarcia zastosowanych środków smarowych, zarówno przed jak i po eksploatacji w parach ciernych w styku liniowym, a także wpływu eksploatacji oleju silnikowego 5W40 w silniku spalinowym samochodu osobowego.

Na podstawie uzyskanych wyników sformułowano wnioski poznawcze i utylitarne, a także wskazano proponowane kierunki dalszych prac badawczych.

## ABSTRACT

This paper presents the current research problem including the influence of the a-C:H:W coating formed on the elements of friction pairs with conformal and non-conformal contact and the lubricant (synthetic engine oils) on the tribological properties of friction pairs under conditions of limited lubrication.

The analysis of the status of the issue includes information on the processes of friction and wear of the friction pairs, classification and characteristics of engine oils, methods of producing surface layers and tribological properties of diamond-like carbon coatings, including the a-C:H:W coating type.

The research conducted on the friction pairs under conditions of limited lubrication allowed to assess the impact of the application of the a-C:H:W coating formed on the elements of the friction pairs and the synthetic lubricating oils on the tribological processes occurring in friction pairs in the conformal and linear contact. This paper shows that the use of ring samples with a-C:H:W coating in conformal contact with counter-samples made of the CuPb30 bearing alloy generates frictional conditions that hinder the creation of stable cooperation conditions. The friction pairs lubricated with the tested oils show higher values of friction parameters and increased wear of counter-samples made of the CuPb30 bearing alloy, as compared to the friction pairs with the heat-treated surface layer. The tests of friction pairs in linear contact with valve shims with the a-C:H:W coating under conditions of lubrication with the tested oils indicate the formation of cooperation conditions that reduce the resistance to motion, temperature in the friction area and the wear rate, as compared to the pairs in which commercial valve shims with hardened surface were used. Additionally, the anti-seizing properties as scuffing load and the limit seizing pressure of the lubricants used were assessed, both before and after operation in friction pairs in a linear contact. An evaluation was also made of the impact of using the 5W40 engine oil in an internal combustion engine of a passenger car.

Based on the obtained results, cognitive and utilitarian conclusions were formulated, as well as suggested directions for further research were indicated.

# ZAŁĄCZNIKI

## Wykaz rysunków

Rysunek 2.1.	Kryteria podziału tarcia [11] .....	9
Rysunek 2.2.	Krzywa Stribecka [7] .....	10
Rysunek 2.3.	Geometria styku płaszczyzn par ciernych: a) styk niekonforemny (liniowy), b) styk konforemny (rozłożony) [13] .....	11
Rysunek 2.4.	Etapy eksploatacji maszyn: I – docieranie, II – zużycie normalne, III – zużycie przyspieszone [14] .....	11
Rysunek 2.5.	Model systemu tribologicznego: 1 – próbka nieruchoma, 2 – przeciwpróbka, 3 – otoczenie węzła tarcia (środowisko), 4 – medium smarujące, 5 – obciążenie węzła tarcia, 6 – kierunek ruchu [7] .....	12
Rysunek 2.6.	Podział procesów zużycia [12] .....	12
Rysunek 2.7.	Klasyfikacja metod wytwarzania warstw powierzchniowych [40] .....	19
Rysunek 2.8.	Podział powłok węglowych ze względu na zawartość wodoru oraz wiązań $sp^2$ i $sp^3$ [39] .....	20
Rysunek 2.9.	Techniki osadzania powłok cienkowarstwowych [4] .....	22
Rysunek 2.10.	Schemat procesu PVD: 1 – argon, 2 – gaz reaktywny, 3 – źródło materiału powłoki, 4 – detale pokrywane powłoką, 5 – pompa podciśnienia [7] .....	23
Rysunek 2.11.	Budowa powłoki a-C:H:W a) obraz SEM, b) schemat budowy powłoki [2, 53] .....	23
Rysunek 2.12.	Przekrój poprzeczny powłok DLC z transmisyjnego mikroskopu elektronowego (TEM): a) konwencjonalna powłoka ta-C, b) powłoka Mesh ta-C [55] .....	24
Rysunek 2.13.	Współczynnik tarcia oraz zużycie objętościowe przeciwpróbek pokrytych powłokami a-C:H, ta-C oraz Mesh ta-C [55] .....	25
Rysunek 2.14.	Współczynnik tarcia w zależności od kompozycji materiałowej i dodatków do oleju bazowego PAO4 w styku rolka-tarcza (po 10700 cyklach) [57] .....	25
Rysunek 2.15.	Wskaźnik zużycia rolek po próbach zużycia w styku rolka-tarcza (skojarzenie materiałowe DLC - DLC) - po 10700 cyklach [51] .....	26
Rysunek 2.16.	Współczynnik tarcia (a), wskaźnik zużycia tarczy (b) oraz wskaźnik zużycia przeciwpróbki 100Cr6 (kulki) (c) badanych powłok DLC po próbach w styku kulka-tarcza - po 5000 cyklach [59] .....	27
Rysunek 2.17.	Moment tarcia w smarowanym węźle ciernym krzywka - popychacz [46] .....	28
Rysunek 2.18.	Współczynnik tarcia w parach ciernych z czopem stalowym bez powłoki (SCM420H) i z powłoką a-C:H:Si (DLC), temperatura początkowa 110°C, prędkość obrotowa wału 5200 obr/min [48] .....	29
Rysunek 2.19.	Powierzchnie czopów wału i współpracujących z nimi łożysk ślizgowych: a) czop stalowy b) czop pokryty powłoką DLC [48] .....	29
Rysunek 2.20.	Chropowatość powierzchni elementów par ciernych bez powłoki i z powłoką a-C:H:Si: a) czop wału, b) łożysko ślizgowe [48] .....	30
Rysunek 2.21.	Powierzchnia czopa wału z powłoką a-C:H:Si z obszarami łuszczenia powłoki DLC [48] .....	30
Rysunek 2.22.	Moment tarcia w parach ciernych z czopem stalowym bez powłoki (SCM420H) i z powłoką a-C:H:Si (DLC), prędkość obrotowa wału $n=5200$ obr/min [60] .....	31
Rysunek 2.23.	Moment tarcia i obciążenie węzła tarcia w funkcji czasu trwania próby: a) czop stalowy bez powłoki (SCM420H), b) czop z powłoką a-C:H:Si (DLC), prędkość obrotowa wału $n=5200$ obr/min [60] .....	31



Rysunek 2.24. Moment tarcia w styku czterokulowym w skojarzeniu materiałowym: a) stal 100Cr6/stal 100CR6, b) powłoka a-C:H:W/stal 100Cr6; temperatura początkowa 23°C [50] .....	33
Rysunek 2.25. Moment tarcia w skojarzeniach materiałowych w styku czterokulowym stal 100Cr6/powłoka a-C:H:W; temperatura początkowa 20°C [63] .....	34
Rysunek 2.26. Powierzchnia powłoki a-C:H po testach w styku kulka - tarcza z widocznym pęknięciem [69] .....	36
Rysunek 2.27. Zużycie liniowe krzywek (a) oraz zużycie objętościowe popychaczy zaworowych (b) [72].....	37
Rysunek 2.28. Powierzchnia popychaczy zaworowych oraz krzywek z powłoką a-C:H:W po próbach stanowiskowych w obecności olejów: a) PAO, b) TMP, c) PAO z dodatkami GMO, MoDTC i ZnDTP, d) TMP z dodatkami GMO, MoDTC i ZnDTP [72].....	38
Rysunek 2.29. Powierzchnia popychaczy zaworowych oraz krzywek z powłoką a-C:H po próbach stanowiskowych w obecności olejów: a) PAO, b) TMP, c) PAO z dodatkami GMO, MoDTC i ZnDTP, d) TMP z dodatkami GMO, MoDTC i ZnDTP [72].....	38
Rysunek 2.30. Przekrój poprzeczny powłoki a-C:H:W z obszarem z nieregularnymi granicami kolumn [68] .....	39
Rysunek 2.31. Uszkodzenia powłoki a-C:H:W po testach w styku kulka-tarcza [68].....	39
Rysunek 2.32. Graniczne obciążenie zużycia $G_{oz}$ i obciążenie zacierające $P_1$ w skojarzeniach ciernych: a) stal - stal, b) powłoka - powłoka [78, 79].....	41
Rysunek 4.1. Kształt i wymiary elementów pary cierniej: a) próbka pierścieniowa, b) przeciwpróbka ze stopu łożyskowego CuPb30, c) przeciwpróbka do badań w styku liniowym (płytki zaworowa) (opracowanie własne).....	47
Rysunek 4.2. Grubość powłoki a-C:H:W ukształtowanej na powierzchni płytek zaworowych (fot. własna) .....	49
Rysunek 4.3. Tester tribologiczny T-05 (fot. własna) .....	50
Rysunek 4.4. Schemat pary kinematycznej testera tribologicznego T-05: 1 – czujnik siły, 2 – próbka pierścieniowa, 3 – olej, 4 – zbiornik oleju, 5 – przeciwpróbka, 6 – ramię przenoszące siłę, 7 – czujnik przemieszczenia, F – siła tarcia, P – obciążenie węzła tarcia [86] .....	50
Rysunek 4.5. Mikroskop optyczny Meiji Techno ML7000 (fot. własna).....	52
Rysunek 4.6. Profilometr Taylor Hobson Surtronic 3+ (fot. własna).....	52
Rysunek 4.7. Waga analityczna Radwag WAA 40/160/X/1 (fot. własna) .....	52
Rysunek 4.8. Aparat czterokulowy T-02U (fot. własna) .....	53
Rysunek 4.9. Schemat skojarzenia cierniego testera tribologicznego T-02U: 1 – kulka górna, 2 – kulki dolne, 3 – uchwyt kulki górnej, 4 – gniazdo kulek wypełnione badanym olejem, P – obciążenie węzła tarcia, n – prędkość obrotowa silnika [88].....	53
Rysunek 4.10. Pomiar śladu zużycia pod mikroskopem ML7000: 1, 2, 3 – kolejność wykonywania pomiarów, A – długość śladu wytarcia na przeciwpróbce (6,35 mm), B – odległość pomiaru od środka śladu zużycia (1 mm), C – szerokość śladu zużycia (opracowanie własne).....	60
Rysunek 4.11. Modelowy przebieg momentu tarcia i obciążenia w funkcji czasu próby na aparacie czterokulowym: 1 – punkt inicjacji zacierania, 2 – punkt zatarcia węzła tarcia, P – obciążenie węzła tarcia, $P_1$ – obciążenie zacierające, $P_{oz}$ – obciążenie zatarcia, $M_t$ – moment tarcia [88] .....	61
Rysunek 5.1. Współczynnik tarcia w parach ciernych z pierścieniami ulepszanymi cieplnie w funkcji prędkości ślizgania i rodzaju oleju smarującego, nacisk jednostkowy 20 MPa.....	63

Rysunek 5.2.	Współczynnik tarcia w parach ciernych z pierścieniami z powłoką a-C:H:W w funkcji prędkości ślizgania i rodzaju oleju smarującego, nacisk jednostkowy 20 MPa.....	64
Rysunek 5.3.	Moment rozruchowy w parach ciernych z próbkami ulepszanymi cieplnie i z powłoką a-C:H:W w funkcji nacisków jednostkowych przy smarowaniu olejami: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS <sub>2</sub> .....	66
Rysunek 5.4.	Siła tarcia i temperatura w obszarze tarcia par ciernych w funkcji czasu i rodzaju oleju – próbki pierścieniowe ulepszone cieplnie, nacisk jednostkowy 20 MPa.....	68
Rysunek 5.5.	Siła tarcia i temperatura w obszarze tarcia par ciernych w funkcji czasu i rodzaju oleju – próbki pierścieniowe z powłoką a-C:H:W, nacisk jednostkowy 20 MPa.....	69
Rysunek 5.6.	Siła tarcia w parach ciernych w zależności od kompozycji pary ciernej i rodzaju oleju przy prędkości ślizgania 1 m/s a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS <sub>2</sub> , (t=35 s).....	72
Rysunek 5.7.	Temperatura w obszarze tarcia w zależności od kompozycji pary ciernej i rodzaju oleju przy prędkości ślizgania 1 m/s przy smarowaniu olejami: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS <sub>2</sub> , (t=35 s).....	73
Rysunek 5.8.	Współczynnik tarcia, zużycie liniowe i temperatura w obszarze tarcia w parach ciernych z próbkami ulepszanymi cieplnie, nacisk jednostkowy 20 MPa.....	75
Rysunek 5.9.	Współczynnik tarcia, zużycie liniowe i temperatura w obszarze tarcia w parach ciernych z próbkami z powłoką a-C:H:W, nacisk jednostkowy 20 MPa.....	77
Rysunek 5.10.	Moment tarcia w parach ciernych w funkcji nacisku jednostkowego i kompozycji pary ciernej przy smarowaniu olejami: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS <sub>2</sub> , (n=100 obr/min, t=1000 s).....	81
Rysunek 5.11.	Temperatura w obszarze tarcia w funkcji nacisku jednostkowego i kompozycji pary ciernej przy smarowaniu olejami: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS <sub>2</sub> , (n=100 obr/min, t=1000 s).....	82
Rysunek 5.12.	Zużycie liniowe elementów par ciernych w funkcji nacisku jednostkowego i kompozycji pary ciernej przy smarowaniu olejami: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS <sub>2</sub> , (n=100 obr/min, t=1000 s).....	85
Rysunek 5.13.	Zużycie masowe $\Delta m$ przeciwpróbek ze stopu CuPb30 przy smarowaniu olejami: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS <sub>2</sub> , (n=100 obr/min, t=1000 s).....	86
Rysunek 5.14.	Parametry chropowatości Ra, Rz, Rq i RSm przeciwpróbek ze stopu łożyskowego CuPb30 i próbek pierścieniowych ulepszanych cieplnie oraz z powłoką a-C:H:W po próbach zużycia w styku rozłożonym przy smarowaniu badanymi olejami, nacisk jednostkowy 20 MPa.....	97
Rysunek 5.15.	Moment rozruchowy w parach ciernych z płytkami zaworowymi utwardzonymi powierzchniowo w funkcji prędkości ślizgania i rodzaju oleju smarującego, siła nacisku 3000 N.....	99
Rysunek 5.16.	Moment rozruchowy w parach ciernych z płytkami zaworowymi z powłoką a-C:H:W w funkcji prędkości ślizgania i rodzaju oleju smarującego, siła nacisku 3000 N.....	100
Rysunek 5.17.	Moment rozruchowy w funkcji siły nacisku w styku liniowym, w zależności od ukształtowanej warstwy powierzchniowej i oleju smarującego: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS <sub>2</sub> .....	102
Rysunek 5.18.	Współczynnik tarcia i temperatura w obszarze tarcia w parach ciernych z płytkami zaworowymi utwardzonymi powierzchniowo przy smarowaniu badanymi olejami, siła nacisku 3000 N.....	103

Rysunek 5.19. Współczynnik tarcia i temperatura w obszarze tarcia w parach ciernych z płytkami zaworowymi z powłoką a-C:H:W przy smarowaniu badanymi olejami, siła nacisku 3000 N.....	105
Rysunek 5.20. Siła tarcia w parach ciernych z płytkami utwardzonymi powierzchniowo i pokrytymi powłoką a-C:H:W w styku liniowym przy smarowaniu olejami: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS <sub>2</sub> , (n=100 obr/min, t=1800 s).....	107
Rysunek 5.21. Temperatura w obszarze tarcia w styku liniowym w funkcji siły nacisku i kompozycji pary cieiernej przy smarowaniu olejami: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS <sub>2</sub> , (n=100 obr/min, t=1800 s) * - wartość w momencie przzerwania próby .....	109
Rysunek 5.22. Szerokość śladu zużycia płytek w funkcji siły nacisku i kompozycji pary cieiernej przy smarowaniu olejami: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS <sub>2</sub> , (n=100 obr/min, t=1800 s), * - wartość w momencie przzerwania próby .....	111
Rysunek 5.23. Zdjęcia śladów zużycia płytek zaworowych po eksploatacji w styku liniowym z olejem nowym 5W40 przy sile nacisku: a) 1800 N, b) 2400 N, c) 3000 N .....	112
Rysunek 5.24. Zdjęcia śladów zużycia płytek zaworowych po eksploatacji w styku liniowym z olejem zużytym 5W40 przy sile nacisku: a) 1800 N, b) 2400 N, c) 3000 N.....	113
Rysunek 5.25. Zdjęcia śladów zużycia płytek zaworowych po eksploatacji w styku liniowym z olejem biodegradowalnym 10W40 przy sile nacisku: a) 1800 N, b) 2400 N, c) 3000 N .....	114
Rysunek 5.26. Zdjęcia śladów zużycia płytek zaworowych po eksploatacji w styku liniowym z olejem PAO8 + MoS <sub>2</sub> przy sile nacisku: a) 1800 N, b) 2400 N, c) 3000 N.....	116
Rysunek 5.27. Parametry chropowatości Ra, Rz, Rq i Rsm płytek utwardzanych powierzchniowo i płytek z powłoką a-C:H:W oraz próbek pierścieniowych ulepszanych cieplnie po próbach zużycia w styku liniowym, siła nacisku 3000 N, * - próba zakończona zatarciem pary cieiernej.....	121
Rysunek 5.28. Moment tarcia M <sub>t</sub> przy zmiennym obciążeniu styku czterokulowego dla olejów przed eksploatacją w styku liniowym (temperatura 40°C) .....	123
Rysunek 5.29. Moment tarcia M <sub>t</sub> przy zmiennym obciążeniu styku czterokulowego dla olejów przed eksploatacją w styku liniowym (temperatura 100°C) .....	124
Rysunek 5.30. Obciążenie zacierające P <sub>t</sub> badanych olejów przed eksploatacją w styku liniowym...	125
Rysunek 5.31. Graniczny nacisk zatarcia p <sub>oz</sub> badanych olejów przed eksploatacją w styku liniowym .....	126
Rysunek 5.32. Moment tarcia M <sub>t</sub> przy zmiennym obciążeniu styku czterokulowego dla oleju nowego 5W40 przed i po próbach w styku liniowym (temperatura 40°C).....	127
Rysunek 5.33. Moment tarcia M <sub>t</sub> przy zmiennym obciążeniu styku czterokulowego dla oleju nowego 5W40 przed i po próbach w styku liniowym (temperatura 100°C).....	128
Rysunek 5.34. Obciążenie zacierające P <sub>t</sub> olejów przed i po eksploatacji w styku liniowym: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS <sub>2</sub> ....	129
Rysunek 5.35. Graniczny nacisk zatarcia p <sub>oz</sub> olejów przed i po eksploatacji w styku liniowym: a) nowy 5W40, b) zużyty 5W40, c) biodegradowalny 10W40, d) PAO8 + MoS <sub>2</sub> ....	131
Rysunek 5.36. Ślady zużycia na kulkach łożyskowych po próbach na aparacie czterokulowym, smarowanie olejem nowym 5W40: a) przed eksploatacją w styku liniowym, b) po eksploatacji w styku liniowym z płytką utwardzaną powierzchniowo, c) po eksploatacji w styku liniowym z płytką z powłoką a-C:H:W .....	133
Rysunek 5.37. Ślady zużycia na kulkach łożyskowych po próbach na aparacie czterokulowym, smarowanie olejem zużytym 5W40: a) przed eksploatacją w styku liniowym, b) po eksploatacji w styku liniowym z płytką utwardzaną powierzchniowo, c) po eksploatacji w styku liniowym z płytką z powłoką a-C:H:W .....	134

Rysunek 5.38.	Ślady zużycia na kulkach łożyskowych po próbach na aparacie czterokulowym, smarowanie olejem biodegradowalnym 10W40: a) przed eksploatacją w styku liniowym, b) po eksploatacji w styku liniowym z płytką utwardzoną powierzchniowo, c) po eksploatacji w styku liniowym z płytką z powłoką a-C:H:W .....	135
Rysunek 5.39.	Ślady zużycia na kulkach łożyskowych po próbach na aparacie czterokulowym, smarowanie olejem PAO8 + MoS <sub>2</sub> : a) przed eksploatacją w styku liniowym, b) po eksploatacji w styku liniowym z płytką utwardzoną powierzchniowo, c) po eksploatacji w styku liniowym z płytką z powłoką a-C:H:W .....	136

## Wykaz tabel

Tabela 2.1.	Klasyfikacja olejów bazowych wg API [21, 22].....	14
Tabela 4.1.	Skład chemiczny stali 34CrNiMo6 [81].....	47
Tabela 4.2.	Właściwości handlowej powłoki węglowej typu a-C:H:W [7].....	48
Tabela 4.3.	Skład chemiczny i właściwości mechaniczne stopu łożyskowego CuPb30 [82].....	48
Tabela 4.4.	Właściwości badanych olejów silnikowych [83, 84, 85] .....	50
Tabela 4.5.	Parametry techniczne testera tribologicznego T-05 „rolka-klocek” produkcji ITeE Radom [87] .....	51
Tabela 4.6.	Parametry techniczne aparatu czterokulowego T-02U produkcji ITeE Radom [88].....	53
Tabela 4.7.	Skład chemiczny stali 100Cr6 [89].....	54
Tabela 4.8.	Parametry pracy testera T-05 w trakcie prób rozruchu w styku rozłożonym .....	56
Tabela 4.9.	Parametry pracy testera T-05 w trakcie badania pary ciernej w ustalonych warunkach prędkości ślizgania w styku rozłożonym .....	57
Tabela 4.10.	Parametry pracy testera T-05 w trakcie prób zużycia w styku rozłożonym.....	57
Tabela 4.11.	Parametry pracy testera T-05 w trakcie prób rozruchu w styku liniowym.....	59
Tabela 4.12.	Parametry pracy testera T-05 w trakcie prób zużycia w styku liniowym.....	60
Tabela 4.13.	Parametry pracy testera T-02U w trakcie badań właściwości przeciwzatarciowych olejów .....	62
Tabela 5.1.	Moment rozruchowy podczas rozruchu par ciernych w styku rozłożonym [Nm] .....	65
Tabela 5.2.	Siła tarcia i temperatura w obszarze tarcia w zależności od kompozycji pary ciernej i nacisku jednostkowego w ustalonych warunkach prędkości ślizgania (v=1 m/s, t=35 s).....	71
Tabela 5.3.	Siła tarcia, zużycie liniowe przeciwpróbek, ubytki masowe i temperatura w obszarze tarcia w trakcie prób zużycia węzła ciernej rolka-klocek w styku rozłożonym (n=100 obr/min, t=1000 s) .....	80
Tabela 5.4.	Parametry chropowatości elementów par ciernych rolka-klocek po próbach zużycia w styku rozłożonym – nacisk jednostkowy 10 MPa.....	88
Tabela 5.5.	Parametry chropowatości elementów par ciernych rolka-klocek po próbach zużycia w styku rozłożonym – nacisk jednostkowy 15 MPa.....	91
Tabela 5.6.	Parametry chropowatości elementów par ciernych rolka-klocek po próbach zużycia w styku rozłożonym – nacisk jednostkowy 20 MPa.....	95
Tabela 5.7.	Moment rozruchowy podczas rozruchu węzła ciernej rolka-klocek w styku liniowym [Nm].....	101
Tabela 5.8.	Siła tarcia i temperatura w obszarze tarcia w funkcji siły nacisku w trakcie prób zużycia węzła ciernej rolka-klocek w styku liniowym (n=100 obr/min, t=1800 s), * - wartość w momencie przerywania próby .....	106

Tabela 5.9.	Szerokość śladu zużycia na płytkach zaworowych z prób zużycia w styku liniowym [ $\mu\text{m}$ ].....	110
Tabela 5.10.	Parametry chropowatości powierzchni elementów par ciernych po badaniach w styku liniowym (siła nacisku 3000 N), * - próba zakończona zatarciem pary ciernej.....	118
Tabela 5.11.	Właściwości przeciwzarciowe środków smarowych przed eksploatacją w styku liniowym.....	124
Tabela 5.12.	Właściwości przeciwzarciowe środków smarowych po eksploatacji w styku liniowym.....	128