



**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



**SZKOŁA
DOKTORSKA**
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Maciej Daszykowski

***WPLYW POWŁOKI AMORFICZNEGO WĘGLA A-C:H:W
ORAZ STOPNIA ZUŻYCIA SYNTETYCZNYCH OLEJÓW
SILNIKOWYCH NA WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE
SMAROWANYCH WĘZŁÓW TARCIA***

PROMOTOR

dr hab. inż. Janusz Lubas

RZESZÓW 2026

*Pragnę wyrazić serdeczne podziękowania mojemu Promotorowi, Panu dr hab. inż. **Januszowi Lubas** za życzliwe wsparcie, cenne wskazówki oraz inspirowanie mnie na każdym etapie powstawania tej rozprawy.*

*Dziękuję także mojej **Rodzinie** za cierpliwość, wyrozumiałość i nieustającą wiarę we mnie. Bez Waszej obecności jak i wsparcia ukończenie tej pracy nie byłoby możliwe.*

Spis treści

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	5
1. WPROWADZENIE	6
2. ANALIZA LITERATUROWA	9
2.1. Charakterystyka olejów silnikowych stosowanych w węzłach tarcia	9
2.1.1. Właściwości użytkowe olejów silnikowych w procesach zużycia.....	13
2.2. Pary cierne w systemach tribologicznych.....	19
2.3. Kształtowanie warstw powierzchniowych węzłów tarcia	21
2.3.1. Powłoki węzłów tarcia z warstwą węgla amorficznego.....	25
2.4. Właściwości tribologiczne powłok węglowych.....	28
2.5. Podsumowanie analizy literaturowej	39
3. CEL, PROBLEM BADAWCZY, ZAKRES ROZPRAWY	43
4. ZAŁOŻENIA PRZEPROWADZENIA BADAŃ WŁASNYCH.....	45
4.1. Obiekty badań własnych.....	45
4.2. Metodyka badawcza	52
4.3. Badania węzłów tarcia w styku konforemnym.....	53
4.4. Badania węzłów tarcia ze stykiem niekonforemnym	55
4.5. Badania olejów silnikowych po przeprowadzonych badaniach	56
4.5.1. Test jednokropłowy	56
4.5.2. Właściwości przeciwzatarciowe olejów silnikowych	59
5. WYNIKI BADAŃ	61
5.1. Procesy tribologiczne w parach ciernych ze stykiem konforemnym	61
5.1.1. Warunki tarcia w parach ciernych	61
5.1.2. Zużycie par ciernych ze stykiem konforemnym	65
5.1.3. Chropowatość warstw powierzchniowych elementów skojarzeń ciernych po badaniach w styku konforemnym.....	75
5.2. Procesy tribologiczne par ciernych ze stykiem niekonforemnym	80
5.2.1. Warunki tarcia w parach ciernych	80
5.2.2. Zużycie pary cierniej ze stykiem niekonforemnym.....	86
5.2.3. Stan warstwy powierzchniowej płytek zaworowych po badaniach w styku liniowym.....	93
5.2.4. Chropowatość warstw powierzchniowych elementów par ciernych po badaniach w styku niekonforemnym.....	100
5.3. Ocena stanu degradacji badanych olejów i ich właściwości tribologicznych ...	108
5.3.1. Stan wizualny badanych olejów w teście jednokropłowym.....	108

5.3.2. Porównanie właściwości przeciwzatarciowych olejów po eksploatacji w styku konforemnym	111
5.3.3. Porównanie właściwości przeciwzatarciowych olejów po eksploatacji w styku niekonforemnym	119
5.3.4. Ocena warstw powierzchniowych skojarzeń ciernych po eksploatacji w styku konforemnym	126
5.3.5. Ocena warstw powierzchniowych skojarzeń ciernych po eksploatacji w styku niekonforemnym	130
6. INTERPRETACJA ORAZ PODSUMOWANIE BADAŃ	143
7. WNIOSKI	158
STRESZCZENIE	163
ABSTRACT	164
LITERATURA	165
WYKAZ ZAŁĄCZNIKÓW	174
Wykaz rysunków	174
Wykaz tabel	178

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

ACEA – Europejskie Stowarzyszenie Producentów Pojazdów (European Automobile Manufacturers Association)

API – Amerykański Instytut Naftowy (American Petroleum Institute)

SAE – Stowarzyszenie Inżynierów Samochodowych (Society of Automotive Engineers)

ILSAC - Międzynarodowy Komitet Standaryzacji i Aprobata Środków Smarowych (International Lubricant Standardization and Approval Committee)

ppm – jednostka miary; części na milion (parts per million)

Ra - średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej [μm]

Rz - największa wysokość chropowatości według 10 najwyższych profili [μm]

Rq - średnie kwadratowe odchylenie profilu [μm]

RSm - średnia szerokość rowków elementów profilu chropowatości [μm]

HV - twardość według skali Vickersa

HRC - twardość według skali Rockwella

HB - twardość według skali Brinella

CVD – chemiczne osadzanie z fazy gazowej

PVD – fizyczne osadzanie z fazy gazowej

TBN – Całkowita liczba zasadowa oleju (Total base number)

Δm – ubytek masowy przeciwpróbki [mg]

F – siła tarcia [N]

μ – współczynnik tarcia

P – siła nacisku [N]

T – temperatura [$^{\circ}\text{C}$]

s – droga tarcia [m]

t – czas [s]

a – przyspieszenie liniowe [m/s^2]

n – prędkość obrotowa [obr/min]

p – nacisk jednostkowy [MPa]

P_t – obciążenie zacierające [N]

P_{oz} – graniczne obciążenie zatarcia [N]

p_{oz} – graniczny nacisk zatarcia [N/mm^2]

MPa – jednostka miary ciśnienia, milion paskali

Kn – liczba Knudsena, bezwymiarowa liczba podobieństwa

a-C:H:W – diamentopodobna amorficzna powłoka węglowa z dodatkiem wolframu

1. WPROWADZENIE

Tarcie jest jednym z najpowszechniejszych zjawisk tribologicznych występujących w przyrodzie oraz jednym z podstawowych procesów destrukcyjnych zachodzących w skojarzeniach ruchowych elementów maszyn. Jest to zbiór zjawisk fizycznych i mechanicznych, takich jak m.in. adhezja powierzchni, deformacja mikronierówności oraz powstawanie i zrywanie mikroszczepień, występujących podczas względnego ruchu ciał, których skutkiem jest powstanie siły oporu przeciwniejszej do kierunku ruchu [84, 87]. Proces tarcia wpływa na zużycie elementów maszyn oraz urządzeń, co stanowi aktualny problem techniczny, naukowy, ekonomiczny i ekologiczny [60]. Niezdatność któregośkolwiek z elementów takiego układu może prowadzić do zakłócenia lub całkowitego przerwania realizacji założonej funkcjonalności, dlatego istotne jest ograniczanie zjawisk tarcia i zużycia poprzez właściwe kształtowanie warunków pracy węzłów tribologicznych [24, 116]. Tribologia jest dziedziną nauki analizującą zjawiska tarcia, zużycia oraz smarowania, występujące w skojarzeniach ruchowych elementów maszyn, definiowana jako nauka zajmująca się zjawiskami zachodzącymi pomiędzy powierzchniami trącymi elementów maszyn i urządzeń [22]. Wskazuje ona przede wszystkim na zagadnienia tarcia, zużywania i smarowania powierzchni, które mają wspólny styk oraz przemieszczają się względem siebie.

Tribologia ukształtowała się w 1966 roku jako nauka, poprzez użycie tejże nazwy w raporcie dla brytyjskiego rządu na temat szkolnictwa, stanu techniki oraz badań w zakresie smarowania maszyn. Raport został opracowany przez brytyjskich naukowców, pod kierownictwem Hansa Petera Josta [39].

Zjawiska tribologiczne towarzyszą funkcjonowaniu urządzeń technicznych i wpływają na wiele aspektów codziennego życia. Ruchome elementy obiektu technicznego podlegają tarcia, które obniża ich sprawność mechaniczną – obniżając tym samym sprawność całego układu [31]. Na samą sprawność składa się wiele kluczowych czynników, przede wszystkim: właściwości geometryczne warstwy powierzchniowej węzłów tarcia, właściwości fizykochemiczne materiałów konstrukcyjnych elementów współpracujących w węzle tarcia, rodzaj i właściwości smarne środka smarnego, sposób jego doprowadzenia do strefy tarcia, rodzaj obciążenia w styku węzła tarcia, temperatura pracy oraz wiele innych czynników. W projektowaniu, jak i wytwarzaniu elementów konstrukcyjnych, biorących udział w tarcia, wykorzystuje się metody wytwarzania warstw powierzchniowych zapewniających jak najkorzystniejsze parametry pracy

elementów węzła tarcia, łącząc przy tym zmniejszanie intensywności ich zużycia [67]. W celu ograniczenia zużycia oraz zapobiegania zatarciu węzłów tarcia materiały stosowane na współpracujące elementy poddawane są modyfikacjom fizykochemicznym lub pokrywane powłokami przeciwzużyciowymi i przeciwzatarciowymi. Zabiegi te prowadzą do poprawy właściwości mechanicznych warstwy powierzchniowej, zwiększając jej odporność na zginanie, pękanie i ścinanie, a także zapewniając odpowiednią twardość powierzchni, co przekłada się na wzrost trwałości eksploatacyjnej elementów węzła tarcia. Współcześnie duże zainteresowanie ukierunkowane jest na powłoki węglowe, charakteryzujące się niskim współczynnikiem tarcia, wysoką twardością, odpornością na zużycie w warunkach ograniczonego smarowania lub tarcia suchego oraz niskim współczynnikiem rozszerzalności cieplnej [119]. Takie parametry powłoki pozwalają na poprawę warunków pracy węzłów tarcia oraz zwiększają trwałość i sprawność całego układu maszynowego. Jednym z materiałów spełniających wiele z wymienionych wymagań jest niskotarciowa powłoka węglowa typu a-C:H:W. Warto przy tym podkreślić, że podczas procesu osadzania tej powłoki temperatura nie przekracza 250 °C, co umożliwia stosowanie jej na elementach wrażliwych termicznie przy jednoczesnym zachowaniu twardości podłoża [26]. Nie można jednak zapomnieć, iż w przypadku powłok nisko-tarciowych, bardzo trudno o dobór odpowiedniego środka smarnego. Aktualnie stosowane środki smarne przeznaczone są głównie dla węzłów tarcia stalowych, a ich zastosowanie w połączeniu z powłokami węglowymi może prowadzić do zwiększonego zużycia lub lokalnych uszkodzeń powierzchni, zwłaszcza w warunkach tarcia suchego lub ograniczonego smarowania, wynikających z odmiennych właściwości powłoki węglowej i innego kształtowania filmu smarnego [7].

Niniejsza rozprawa doktorska dotyczy analizy wpływu technologicznie ukształtowanej powłoki węglowej typu a-C:H:W na właściwości tribologiczne wybranych węzłów tarcia pracujących w styku konforemnym i niekonforemnym w warunkach ograniczonego smarowania. W pracy uwzględniono również wpływ olejów silnikowych na przebieg procesów tribologicznych zachodzących w badanych skojarzeniach ciernych. Dodatkowo przeprowadzona zostanie charakterystyka wybranych olejów silnikowych w warunkach zróżnicowanych obciążeń oraz parametrów pracy węzła tarcia. Dobór środków smarnych oraz odpowiednich technologii kształtowania warstw powierzchniowych ma znaczący wpływ na trwałość wybranych węzłów tarcia, co może determinować możliwość ich zastosowania w określonych obiektach technicznych, np. silnikach spalinowych. Można przyjąć, że właściwie dobrana

kompozycja tribologiczna węzła ciernego prowadzi do ograniczenia strat energii w ogólnym bilansie pracy silnika spalinowego poprzez zmniejszenie oporów tarcia w smarowanych układach tribologicznych [62, 95].

2. ANALIZA LITERATUROWA

2.1. Charakterystyka olejów silnikowych stosowanych w węzłach tarcia

Oleje silnikowe stanowią podstawowy element zabezpieczenia elementów silnika spalinowego przed zużyciem w wyniku tarcia oraz stabilizują temperaturę w wybranych układach, co przyczynia się do zwiększenia trwałości elementów konstrukcyjnych, takich jak tłoki, popychacze, łożyska, pierścienie tłokowe czy wałki rozrządu [24, 97, 122]. Ich podstawową funkcją jest rozdzielenie współpracujących elementów pary ciernej, co prowadzi do zmniejszenia oporów ruchu, tłumienia drgań, chłodzenia elementów oraz ograniczenia strat energii wynikających z pokonywania oporów tarcia. Oleje silnikowe zapewniają również utrzymanie szczelności gazowej oraz czystości zespołów współpracujących. Ponadto istotną cechą olejów silnikowych jest zmniejszenie procesów utleniania elementów silnika, co wynika z odpowiedniego składu baz olejowych oraz dodatków uszlachetniających [3, 32, 48, 124].

Oleje silnikowe pracują w szerokim zakresie temperatur oraz obciążeń, przy zróżnicowanych warunkach pracy podzespołów, w których są stosowane. Środki smarne stosowane w silnikach spalinowych muszą zachowywać odpowiednie właściwości eksploatacyjne zarówno w warunkach wysokich temperatur i dużych obciążeń, jak i podczas rozruchu silnika w niskich temperaturach [105]. Zważając na zapewnienie ochrony środowiska i energooszczędności, oleje muszą również spełniać zróżnicowane wymagania tribologiczne czy reologiczne. Oleje silnikowe klasyfikuje się do odpowiednich klas lepkościowych na podstawie parametrów lepkościowych, przede wszystkim lepkości kinematycznej i dynamicznej w określonych warunkach temperaturowych [5]. Dodatkowo, oleje silnikowe zawierają dodatki uszlachetniające, których zadaniem jest otrzymanie określonych dla oleju wymagań eksploatacyjnych w całym cyklu eksploatacyjnym oleju w silniku spalinowym. Udział dodatków uszlachetniających w oleju silnikowym może wynosić nawet do 20% [97]. Dodatki, które najczęściej producenci olejów stosują, to między innymi: przeciwutleniające, przeciwkorozyjne, obniżające temperaturę krzepnięcia, temperaturę pienienia się olejów i poprawiające charakterystyki smarne oraz dodatki dyspersyjne [30].

Jednym z podstawowych podziałów olejów silnikowych jest klasyfikacja oparta na podziale na trzy zasadnicze grupy w zależności od oleju bazowego:

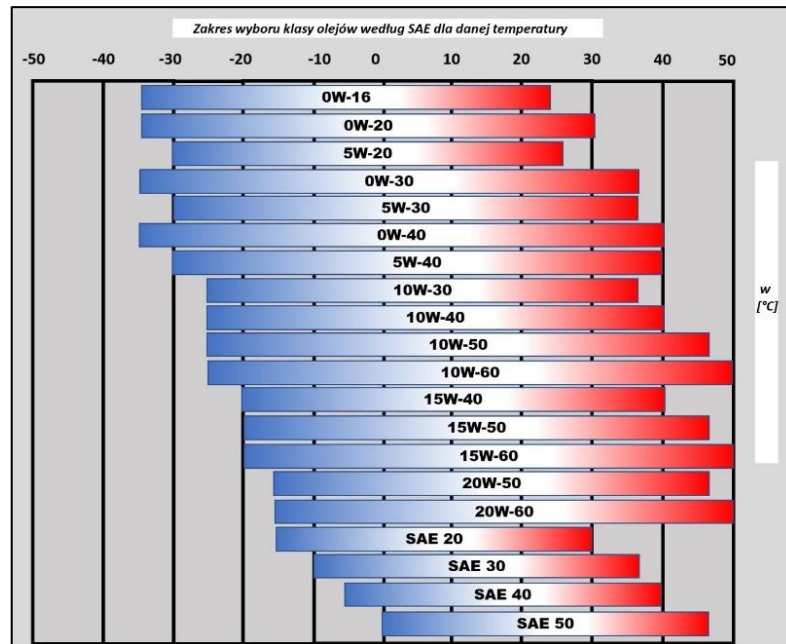
- oleje syntetyczne wytwarzane z komponentów bazowych otrzymywanych w procesach syntezy chemicznej, polegających na kontrolowanym łączeniu

cząsteczek o ściśle zdefiniowanej strukturze molekularnej. Z uwagi na wysoką czystość oraz jednorodność składu, uznawane są za najbardziej zaawansowane technologicznie. Charakteryzują się korzystniejszymi właściwościami użytkowymi w porównaniu do olejów mineralnych i półsyntetycznych, wykazują podwyższoną odporność na obciążenia termiczne, niską lepkość w warunkach obniżonej temperatury oraz stabilność parametrów w szerokim zakresie pracy, co przekłada się na skuteczną ochronę elementów silnika spalinowego,

- oleje mineralne wytwarzane są w procesie rafinacji ropy naftowej. Stosowane są tam, gdzie wymagana jest zwiększona lepkość i nie jest istotna jednorodność składu – mogą zawierać węglowodory lub siarkę, co sprzyja tworzeniu się tzw. nagaru,
- oleje półsyntetyczne są produkowane na bazie połączenia olejów mineralnych z dodatkiem olejów syntetycznych, tworząc w ten sposób produkt pośredni, łączący cechy charakterystyczne dla obu substancji.

Obok podziału olejów na syntetyczne, mineralne i półsyntetyczne najczęściej stosowanym systemem podziału olejów jest norma lepkościowa SAE (Society of Automotive Engineers [Stowarzyszenie Inżynierów Motoryzacji]), która określa zakres lepkości oleju w określonych warunkach temperatury, umożliwiając jednoznaczne dopasowanie środka smarnego do wymagań konstrukcyjnych i eksploatacyjnych silnika (rys. 2.1). Klasyfikacja ta oparta o klasę lepkości oleju silnikowego określa jego właściwości smarne zarówno w wysokiej, jak i niskiej temperaturze eksploatacji [43]. Klasyfikacja ta dzieli oleje na klasy letnie – oznaczone samymi liczbami – oraz zimowe – oznaczane dodatkowo literą W (z ang. Winter). W większości stosowanych olejów silnikowych występuje oznaczenie odnoszące się zarówno do warunków zimowych, jak i letnich, np. oznaczenie 10W40.

Istotne znaczenie w klasyfikacji olejów silnikowych ma zestaw norm API (American Petroleum Institute - Amerykański Instytut Naftowy), określający właściwości oleju w kontekście typu silnika i warunków eksploatacyjnych. Klasyfikacja ta wyróżnia pięć różnych grup, które różnią się pomiędzy sobą właściwościami fizycznymi, sposobem otrzymywania oraz składem chemicznym (tab. 2.1) [4]. Pierwsza, druga oraz trzecia grupa według tejże klasyfikacji są bazami tworzonymi z ropy naftowej. Czwarta grupa to oleje w pełni syntetyczne, natomiast piąta grupa to wszystkie inne bazowe oleje niezawarte w grupach wyżej wymienionych [4].



Rysunek 2.1. Podział klas lepkości SAE na zastosowanie wybranej klasy dla danej temperatury [37]

Tabela 2.1. Klasyfikacja olejów bazowych wg API [9]

Grupa oleju bazowego	I	II	III	IV	V
Lepkość [mm ² /s]	≥80 - <120	≥80 - <120	≥120	PAO (Polialfaolefiny)	Wszystkie oleje bazowe nienależące do grup I-IV w tym oleje roślinne
Zawartość siarki [% masy]	>0,03%	≤0,03%	≤0,03%		
Węglowodory nasycone [% masy]	>0%	≥90%	≥90%		

W tej klasyfikacji pierwsze trzy grupy łączą w sobie konwencjonalne oleje mineralne i niekonwencjonalne. Pierwsze z wymienionych otrzymywane są poprzez rafinację frakcji węglowodorowych ropy naftowej, natomiast drugie otrzymywane są poprzez wodorowe procesy katalityczne. Grupę czwartą oraz piątą dopełniają kolejno oleje typu PAO (polialfaolefiny), czyli syntetyczne węglowodory, mające strukturę izoparafin w grupie czwartej, oraz estry kwasu fosforowego, estry kwasu krzemowego czy estry kwasów karboksylowych w grupie piątej [9].

Kolejną klasyfikacją olejów silnikowych jest klasyfikacja europejska ACEA (European Automobile Manufacturers' Association - Europejskie Stowarzyszenie Producentów Pojazdów). Organizacja zaleca producentom olejów wytwarzanie coraz lepszych jakościowo olejów, jednak z zachowaniem standardów oraz norm uznawanych w eksploatacji olejów silnikowych [44]. Występujące różnice konstrukcyjne silników

spalinowych wytwarzanych w Europie i w Stanach Zjednoczonych są przyczynami powstania odrębnej kwalifikacji olejów. Klasyfikacja ACEA dzieli się na kilkanaście klas oraz podklas. Każde z oznaczeń łączy ze sobą literę oraz liczbę. Liczba to kategoria, natomiast litera to klasa – przykładowo oznaczenie: ACEA A3 należy rozumieć jako:

- ACEA – specyfikacja ACEA,
- A - klasa typu A,
- 3 – kategoria 3-cia.

Klasyfikacja ACEA dzieli się na klasy:

- klasa A - są to oleje silnikowe dla silników benzynowych,
- klasa B - są to oleje silnikowe dla silników wysokoprężnych w pojazdach osobowych i dostawczych do 3,5 tony,
- klasa C - te oleje silnikowe są stosowane dla obu typów silników, lecz takich, które są wyposażone w filtry cząstek stałych takich jak np. DPF,
- klasa E - oleje silnikowe dla silników wysokoprężnych w pojazdach powyżej 3,5 tony.

W klasach A oraz B, występuje podział na liczby od 1 do 5, w klasie C – od 1 do 4, natomiast w klasie E od 1 do 9. Liczby odnoszą się do wybranych właściwości oleju w dziedzinie ochrony silnika przed zużyciem. Im wyższa jest wartość liczbowa, tym lepsze właściwości przeciwzatarciowe ma dany olej. Dokładniejsza analiza przedstawionych klas ACEA została przedstawiona w tabeli 2.2 (tab. 2.2) [35, 40].

Tabela 2.2. Klasyfikacja olejów bazowych wg ACEA [35]

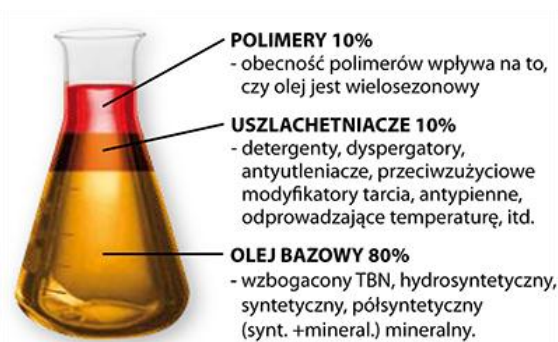
Klasa	Zastosowanie	Właściwości
A/B	Benzyna/diesel	Standardowe
A1/B1-04	Benzyna/diesel do 3,5 tony, wydłużona eksploatacja pomiędzy wymianą oleju	Niska lepkość wysoko-temperaturowa HTHS 2,6 – 3,5
A3/B3-04	Benzyna/diesel wydłużona eksploatacja pomiędzy wymianą oleju, trudne warunki pracy	HTHS <3,5, Popiół siarczanowy 0,9-1,5 [% wag]
A5/B5-04	Nowoczesne silniki zasilane benzyną/diesel do 3,5 tony, wydłużona eksploatacja pomiędzy wymianą oleju	HTHS 2,5-3,5, Popiół siarczanowy <1,6 [% wag]
C1-04	Benzyna/diesel do 3,5 tony z DPF/TWC, wymagających olejów lekko bieżnych	HTHS <3,2, Popiół siarczanowy <1,1 [% wag]

C2-04	Benzyna/diesel do 3,5 tony z DPF/TWC, wymagających olejów lekko bieźnych	HTHS 2,6-2,9, Popiół siarczanowy <0,8 [% wag], Siarka <0,3 [% wag]
C3-04	Benzyna/diesel do 3,5 tony z DPF/TWC, wymagających olejów lekko bieźnych	HTHS <3,5, Popiół siarczanowy <0,8 [% wag], Siarka <0,3 [% wag]
C4-04	Benzyna/diesel do 3,5 tony z DPF/TWC, wymagających olejów lekko bieźnych	HTHS <3,5, Popiół siarczanowy <0,5 [% wag], Siarka <0,2 [% wag]
C5-04	Benzyna/diesel do 3,5 tony z DPF/TWC, wymagających olejów lekko bieźnych,	Średnia zawartość popiołów SAPS, HTHS 2,6-2,9, Popiół siarczanowy <0,8 [% wag], Siarka <0,3 [% wag]
C6-04	Benzyna/diesel, silniki wysokoprężne pracujące z wydłużonymi okresami pomiędzy wymianami – tzw. Long Life [28]	Średnia zawartość popiołów SAPS, HTHS 2,6-2,9, Popiół siarczanowy <0,8 [% wag] Fosfor 0,07-0,09 [% wag] Siarka <0,3 [% wag]
E2-96	Silniki diesla wolnossące oraz z turbodoładowaniem z lat 80/90, krótkie okresy wymiany oleju	standardowe
E4-99	Silniki diesla z dłuższymi okresami wymiany oleju, bez filtrów DPF	HTHS 2,1-2,5
E6-04	Silniki diesla z długimi okresami wymiany oleju, dbają o czystość tłoków	standardowe
E7-04	Silniki diesla z długimi okresami wymiany oleju, dbają o czystość tłoków, nie dla filtrów DPF, lecz z układami EGR	HTHS 2-2,2

2.1.1. Właściwości użytkowe olejów silnikowych w procesach zużycia

Zużycie środka smarnego (oleju) odgrywa istotną rolę w procesie smarowania maszyn i silników spalinowych. Oleje silnikowe pracują w różnych warunkach obciążenia oraz w szerokim zakresie temperatur, co bezpośrednio wpływa na ich skuteczność smarowania i trwałość [111]. Wpływ na zużycie oleju ma bardzo dużo

różnych czynników. Badacze różnicują zmiany właściwości użytkowych olejów w zależności od rodzaju stosowanego paliwa silniku spalinowym, częstotliwości wymian, konstrukcji pary ciernej i jej komponentów materiałowych, a także warunków obciążenia. Oleje silnikowe oprócz funkcji tribologicznych, zapewniających prawidłową pracę węzłów tarcia, dodatkowo uszczelniają układ tłok–cylinder, a także przemieszczają zanieczyszczenia i produkty zużycia do filtra oleju [9, 60, 97, 114]. Zużycie środka smarnego w podzespołach silnika może prowadzić do nadmiernego zużycia elementów konstrukcyjnych, co może skutkować poważnym uszkodzeniem całego silnika [120].



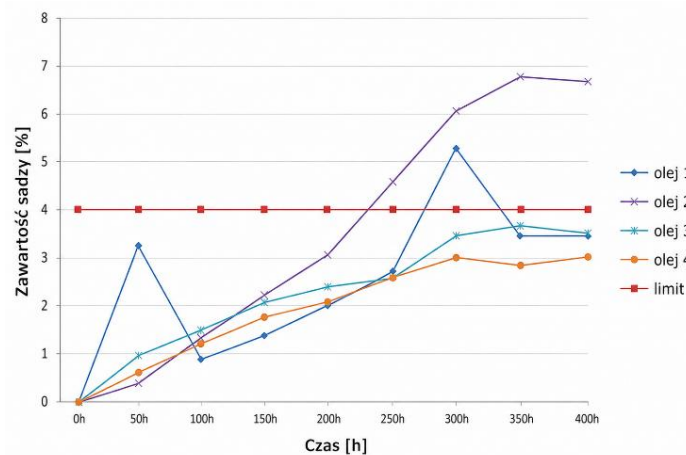
Rysunek 2.2. Główne składowe oleju [42]

Istotnym aspektem determinującym właściwości eksploatacyjne oleju jest jego skład, obejmujący olej bazowy stanowiący około 80% objętości oraz dodatki uszlachetniające, w tym polimery modyfikujące lepkość (około 10%) i inne dodatki funkcjonalne (około 10%) (rys. 2.2). Spadek właściwości oleju, takich jak lepkość czy zdolność do smarowania, wpływa bezpośrednio na efektywność działania par ciernych, zwiększając tarcie i zużycie współpracujących warstw powierzchniowych elementów ciernych. W konsekwencji, niewłaściwa kondycja oleju może prowadzić do podwyższonej temperatury pracy, powstawania nagaru oraz skracania żywotności krytycznych elementów silnika. Dlatego monitorowanie stanu oleju silnikowego, regularne wymiany i dobór odpowiedniego typu i klasy oleju silnikowego mają kluczowe znaczenie dla utrzymania trwałości i niezawodności całego układu napędowego [42, 114].

Zmiany właściwości użytkowych olejów silnikowych powodują również niespalone paliwo jak i dodatki stosowane w paliwie, które w warunkach eksploatacji przenikają do oleju, a w podwyższonym stężeniu powodują:

- powstanie osadów i szlamów w silniku,
- utratę właściwości smarnych oleju,

- zmniejszenie parametru lepkości oleju,
- przyśpieszenie utleniania oleju, czego następstwem jest skrócenie okresów między wymianami [113].

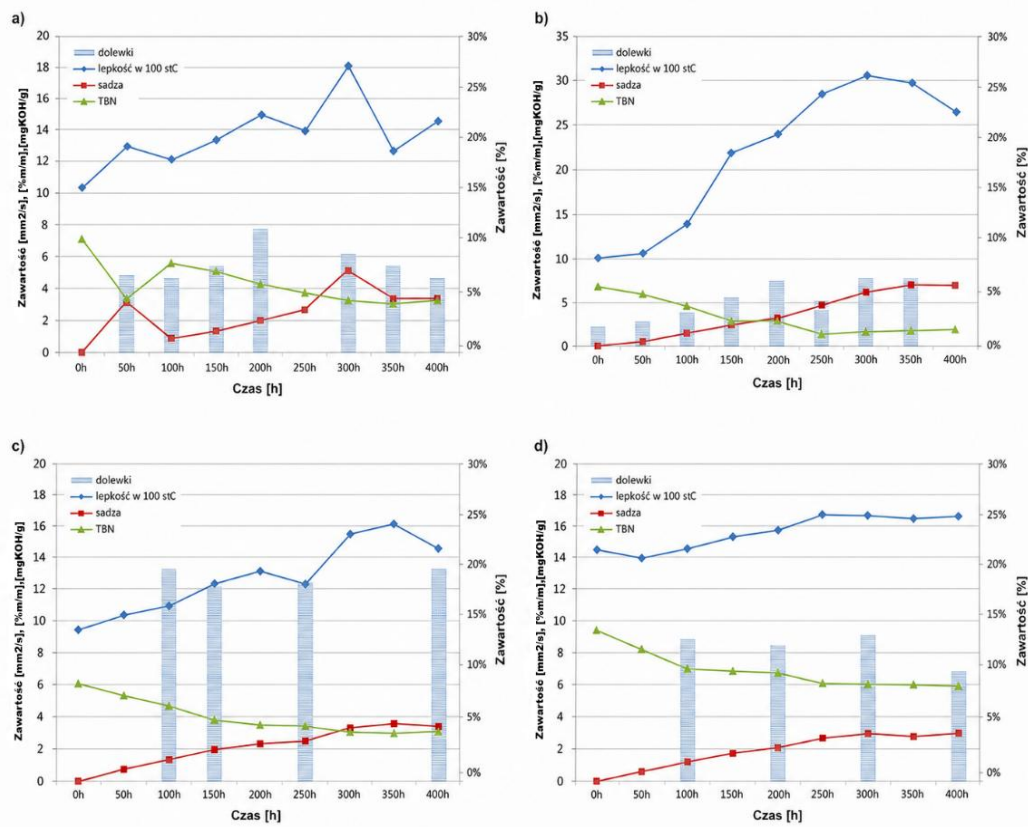


Rysunek 2.3. Zawartość sadzy w olejach [114]

W literaturze wyniki badań olejów silnikowych są przedstawiane w zależności od wielu czynników fizyko-chemicznych, w szczególności takich jak rodzaj oleju, producent oleju, klasa lepkości i zmienne warunki eksploatacji [114]. W badaniach czterech rodzajów olejów silnikowych różnych producentów, analizowano zmiany: lepkości kinematycznej, wartości TBN (Całkowita Liczba Zasadowa, ang. Total Base Number), ilość pierwiastków metali oraz zawartość sadzy. Badania przeprowadzono na hamowni silnikowej z użyciem nowych silników o zapłonie samoczynnym (pojemność 1900 cm³) w czasie 400 godzin pracy. W trakcie badań, co 50 godzin pobierano próbkę oleju, przeprowadzając analizę chemiczną zmian parametrów oleju oraz powstałych zanieczyszczeń. Podczas prób trwałościowych z olejami oznaczonymi 3 oraz 4 nie przekroczone 4% zawartości sadzy (w olejach 3 i 4 maksymalna zawartość sadzy osiągnęła wartości 3,8% i 3,1% masy), gdy w próbach z olejami 1 oraz 2, ta wartość została przekroczona i w oleju 1 wyniosła 5,4%, a w oleju 2 niemal 7% (rys. 2.3) [114]. Wzrost zawartości sadzy w badanych olejach spowodował zwiększenie lepkości oleju odpowiednio o (rys. 2.4):

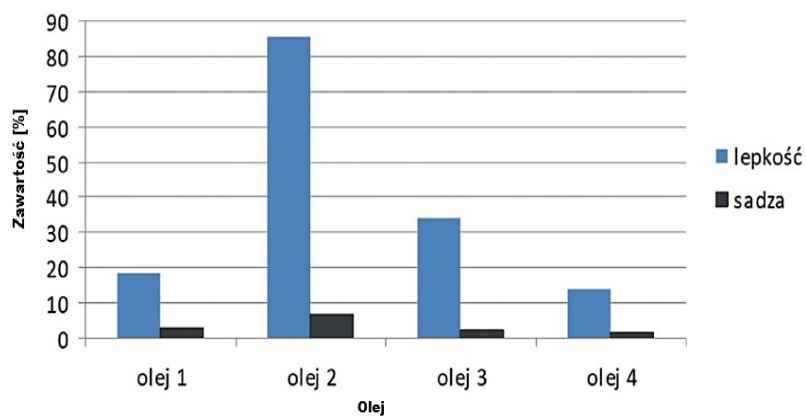
- 19% oleju 1 przy wzroście zawartości sadzy o 3%,
- 84% oleju 2 przy wzroście zawartości sadzy o 8%,
- 34% oleju 3 przy wzroście zawartości sadzy o 3%,
- 14% oleju 4 przy wzroście zawartości sadzy o 2%.

W olejach zarejestrowano także zmniejszenie się liczby zasadowej, co świadczy o zużywaniu się dodatków uszlachetniających, które odpowiadają za właściwości



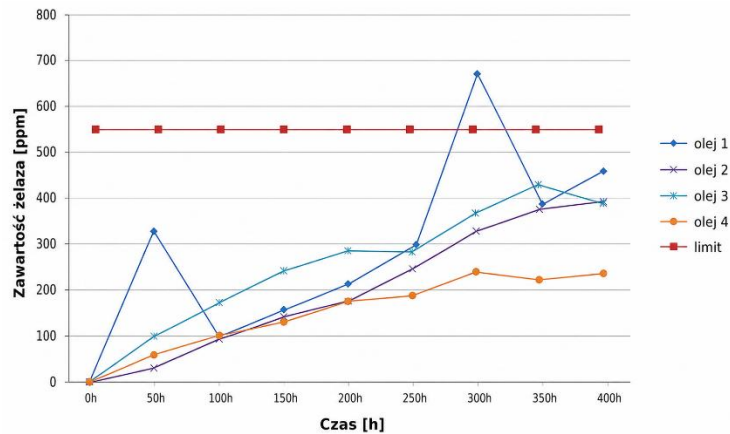
Rysunek 2.4. Badania olejów: a) olej 1, b) olej 2, c) olej 3, d) olej 4 [114]

fizykochemiczne oleju oraz neutralizację kwaśnych produktów paliwa [114]. Zastosowanie podczas badań silnikowych dolewek czystego oleju spowodowało zmniejszenie parametru TBN, jednak istotne zmiany zarejestrowano tylko w próbkach oleju 3 oraz 4 [114].



Rysunek 2.5. Stosunek zawartości sadzy do wzrostu lepkości [114]

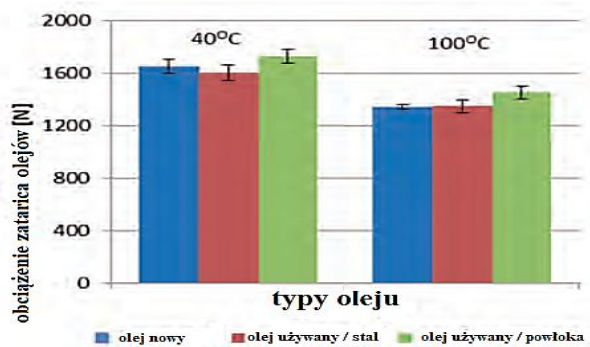
Największe różnice zmian lepkości olejów dotyczą oleju 2, gdzie wzrost lepkości jest około 4,5 razy większy w porównaniu do oleju 1, około 3 razy większy niż oleju 3 oraz 5 razy większy oleju 4 (rys. 2.5) [114].



Rysunek 2.6. Zawartość żelaza w badanych olejach podczas próby [114]

W tych badaniach analizowano zawartość ilościową żelaza w olejach w trakcie prób silnikowych (rys. 2.6). Przyjęto w badaniach olejów silnikowych dopuszczalną zawartość żelaza wynoszącą 550 ppm i pomiary wykazały, że jedynie w oleju 1 po próbach wartość ta została przekroczona. Po 300 godzinach pracy w oleju 1 koncentracja żelaza wynosiła około 685 ppm, gdy po tym samym czasie pracy olej 2 zawierał 340 ppm, olej 3 - 380 ppm, zaś olej 4 zawierał najmniej żelaza – 250 ppm [114]. Autorzy tych badań stwierdzili, że niewielkie dolewki świeżego oleju do oleju przepracowanego korzystnie wpływają na jego właściwości użytkowe, a zawartość sadzy wpływa na zwiększenie lepkości oleju.

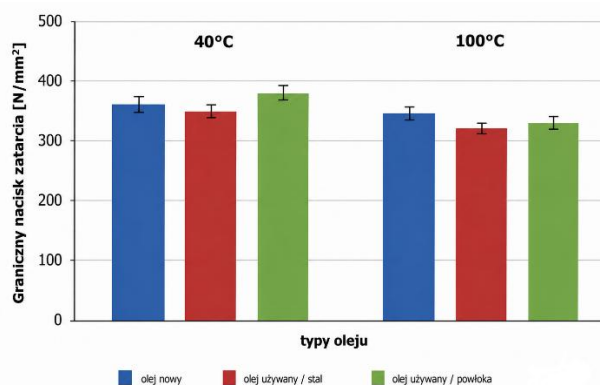
W badaniach właściwości przeciwzatarciowych oleju silnikowego 10W40 biodegradowalnego, zastosowano próbki oleju w 3 stanach zużycia: olej nowy (komercyjny), olej używany do smarowania pary ciernej z próbką stalową i olej używany do smarowania pary ciernej z próbką z powłoką a-C:H [66].



Rysunek 2.7. Obciążenie zacierające oleju silnikowego 10W40 biodegradowalny [66]

Badania przeciwzatarciowe tych olejów silnikowych przeprowadzono w temperaturach 40°C i 100°C. Analiza wyników wykazała, że olej użyty w parach

z powłoką a-C:H wykazuje większe obciążenie zacierające niż olej nowy. W temperaturze 40°C, różnica obciążenia zacierającego stanowiła około 5% w porównaniu z nowym olejem, natomiast w temperaturze 100°C różnica wynosiła 8%. W temperaturze 40°C najniższą odporność na zacieranie wykazywał olej pracujący w skojarzeniu z próbkami stalowymi bez powłoki, natomiast w temperaturze 100°C olej nowy. W temperaturze 100°C stwierdzono istotne zmniejszenie obciążenia zacierającego względem badań w temperaturze 40°C: dla nowego biodegradowalnego oleju 10W40 spadek ten wynosił około 20%, natomiast dla oleju zużytego około 15% [66].



Rysunek 2.8. Graniczny nacisk zatarcia oleju silnikowego 10W40 biodegradowalny [66]

Graniczny nacisk zatarcia badanego oleju wykazał, iż wzrost temperatury testu powoduje zmniejszenie jego wartości, zwłaszcza oleju używanego w parze cierniej z próbką stalową (rys. 2.8). Graniczny nacisk zatarcia w temperaturze 40°C dla oleju użytego w parze cierniej z powłoką a-C:H jest wyższy o 6% w porównaniu do wartości nacisku dla oleju nieużywanego. W przypadku użytego oleju w parze z próbką stalową, wartość nacisku zatarcia była niższa o około 2% w porównaniu do oleju nieużywanego. W temperaturze 100°C, graniczny nacisk zatarcia oleju nowego był najwyższy, mniejszy o 8% dla oleju używanego w parze z próbką stalową i mniejszy o 6% dla oleju użytego w parach ciernych z powłoką a-C:H [66].

Pogorszenie właściwości przeciwwzatarciowych badanych olejów silnikowych, mogło być spowodowane zanieczyszczeniem oleju produktami zużycia i zmniejszeniem ilości dodatków przeciwwzatarciowych w procesie tarcia. W warunkach tarcia z ograniczonym smarowaniem w obszarze styku, to dodatek przeciwwzatarciowy w oleju silnikowym jest odpowiedzialny za tworzenie warstw granicznych, które zapobiegają zatarciu węzła tarcia. Z drugiej jednak strony, autorzy podkreślają, iż wzrost obciążenia zacierającego można wytłumaczyć penetracją węgla, który wykazuje właściwości smarne. Badania potwierdzają, że zużycie olejów podczas pracy wpływa na pogorszenie

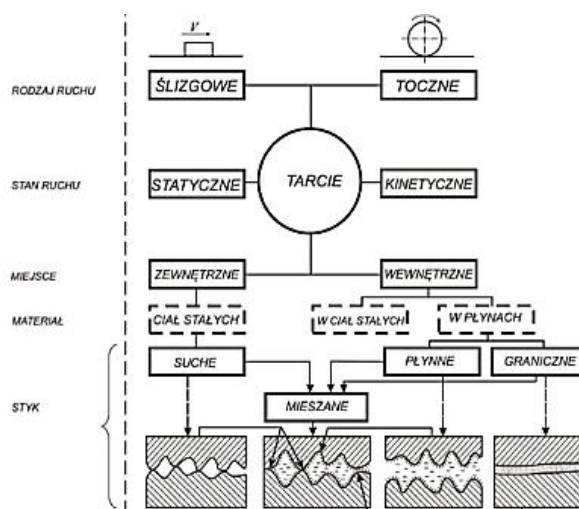
ich właściwości tribologicznych, choćby poprzez zanieczyszczenia materiałem elementów pary ciernej oraz rozpadem przeciwzatarciowych dodatków uszlachetniających [29, 66, 114].

2.2. Pary cierne w systemach tribologicznych

Pary cierne to podstawowe układy urządzeń czy podzespołów, stosowane głównie w przemyśle motoryzacyjnym głównie w skrzyniach biegów i silnikach spalinowych. Ich prawidłowe funkcjonowanie determinuje trwałość oraz właściwości eksploatacyjne układów. Istotnym czynnikiem eksploatacyjnym decydującym o funkcjonalności pary ciernej są zjawiska tarcia występujące na styku warstw powierzchniowych elementów pary. Tarcie generowane w węzłach tarcia można podzielić na kategorie w zależności od jego lokalizacji w obrębie styku na [58]:

- tarcie zewnętrzne w styku warstw powierzchniowych dwóch ciał stałych lub styku ciała stałego z gazem lub cieczą;
- tarcie wewnętrzne zachodzące w objętości jednego ciała, gdzie przemieszczają się względem siebie grupy atomów, cząstek chemicznych i tym podobne struktury materiałowe.

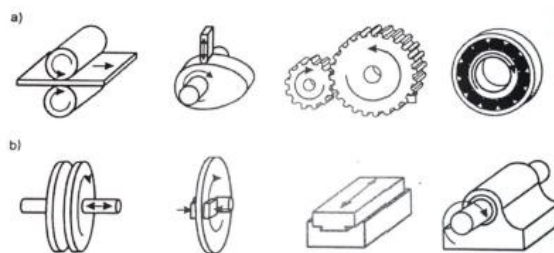
Rozpowszechniony w literaturze podział tarcia przedstawił w swojej pracy Zbigniew Lawrowski, gdzie tarcie zostało podzielone ze względu na rodzaj ruchu, stan ruchu, miejsce, materiał i styk (rys. 2.9) [62].



Rysunek 2.9. Kryteria podziału tarcia [62]

W literaturze badającej skojarzenia cierne analizuje się tarcie głównie ze względu na rodzaj styku powierzchni trących [62, 95]:

- tarcie graniczne występuje, gdy warstwa smaru jest na tyle cienka, iż znajduje się ona w obszarze działania sił powierzchniowych ciała stałego [49]. Tarcie graniczne często wykorzystuje się w węzłach ślizgowych smarowanych, gdzie cienka warstwa środka smarnego chroni elementy węzła tarcia przed tarciem suchym [62];
- tarcie suche występuje w styku czystych warstw powierzchniowych ciał stałych. W warunkach próżni określane jest jako tarcie suche fizyczne, natomiast w warunkach atmosferycznych ze względu na adsorpcję cząsteczek gazów i innych związków jako tarcie suche techniczne [58]. Tarcie suche charakteryzuje się tym, że od 80 do 95% energii mechanicznej ulega przemianie w ciepło, natomiast pozostała część jest wydatkowana na emisję jonów i elektronów oraz odkształcenia plastyczne materiału. W warunkach tarcia suchego pomiędzy elementami pary ciernej nie występuje środek smarny;
- tarcie płynne charakteryzuje się obecnością środka smarnego w postaci cieczy, która tworzy ciągłą warstwę smarną oddzielającą współpracujące warstwy powierzchniowe, eliminując tym samym bezpośredni kontakt ich nierówności;
- tarcie mieszane jest połączeniem tarcia suchego, płynnego oraz granicznego, bądź co najmniej dwóch ich rodzajów. Występuje w obszarze styku, gdy w jego części stykają się bezpośrednio ze sobą warstwy powierzchniowe (jest to tarcie suche), natomiast inna część jest rozdzielona pewną warstwą graniczą smaru (tarcie graniczne), a jeszcze inna część styku jest rozdzielona całkowicie warstwą cieczy smarującej (tarcie płynne) [58].



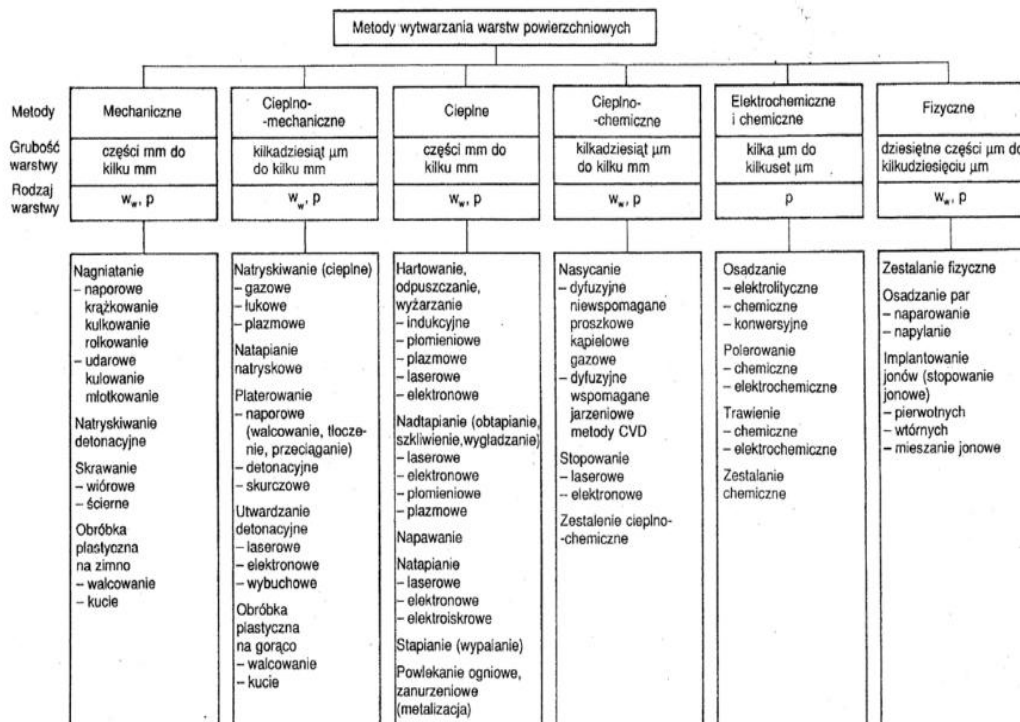
Rysunek 2.10. Styki płaszczyzn par ciernej; a) styk niekonforemny, b) styk konforemny [49]

W tribologicznych węzłach tarcia ze względu na geometrię obszaru styku wyróżnia się skojarzenia cierne o [49]:

- styku konforemnym (nazywany również stykiem rozłożonym bądź stykiem powierzchniowym) – występuje najczęściej w silnikach spalinowych, w postaci węzła tarcia wał korbowy – łożyska ślizgowe wału,
- styku niekonforemnym (nazywany również stykiem liniowym lub punktowym) – występuje w silnikach spalinowych w układzie wtryskowym silników o zapłonie samoczynnym (pompowtryskiwacze), w pompach paliwa czy w rozrządzie jako węzeł krzywka-popychacz (rys. 2.10) [49].

2.3. Kształtowanie warstw powierzchniowych węzłów tarcia

W ostatnich latach obserwuje się intensywny rozwój techniki związany z wdrażaniem procesów kształtowania warstw powierzchniowych, mających na celu zwiększenie trwałości konstrukcji przy jednoczesnym ograniczeniu jej wymiarów i masy. Proces kształtowania warstw powierzchniowych realizowany jest z użyciem metod mechanicznych, cieplnych, ciepło-mechanicznych, chemicznych, elektrochemicznych, ciepło-chemicznych i fizycznych (rys. 2.11) [12, 68]. Metody mechaniczne można



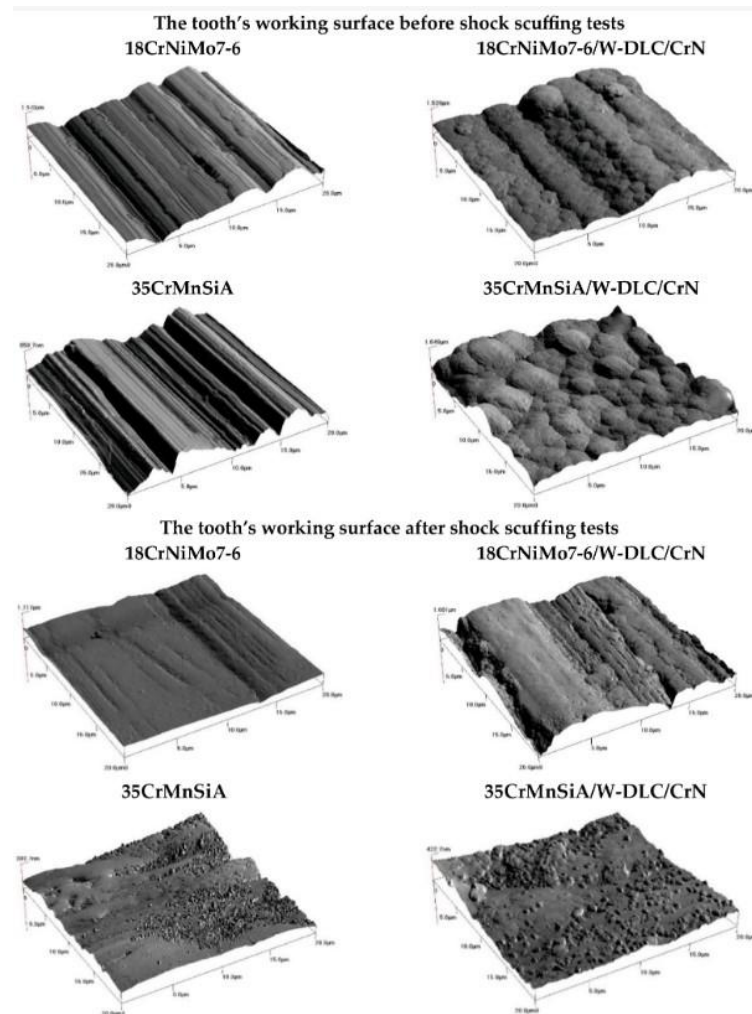
Rysunek 2.11. Klasyfikacja metod wytwarzania warstw powierzchniowych [12]

podzielić m.in. na nagniatanie, skrawanie, natryskiwanie detonacyjne czy obróbkę plastyczną na zimno. Grubość powstałej warstwy to części mm do kilku mm. Ciepło-mechaniczne to natryskiwanie ciepłe (np. gazowe, łukowe czy plazmowe), natapianie

natryskowe czy obróbka plastyczna na gorąco. Grubość warstwy wynosi od kilkudziesięciu μm do kilku mm. Są one zbliżone do metod mechanicznych, jednak z czynnikiem podwyższonej temperatury. Metody cieplne to hartowanie, nadtapianie, napawanie, natapianie, stapianie lub powlekanie ogniowe. Metody cieplno-chemiczne to przede wszystkim nasycanie, stopowanie i zestalenie cieplno-chemiczne. Metody elektrochemiczne i chemiczne to metody osadzania, polerowania, trawienia i zestalania chemicznego, z grubością warstwy od kilku do kilkuset μm . Metody fizyczne to osadzanie par, implantowanie jonów. Grubość ich warstwy to dziesiąte części do kilkudziesięciu μm [12].

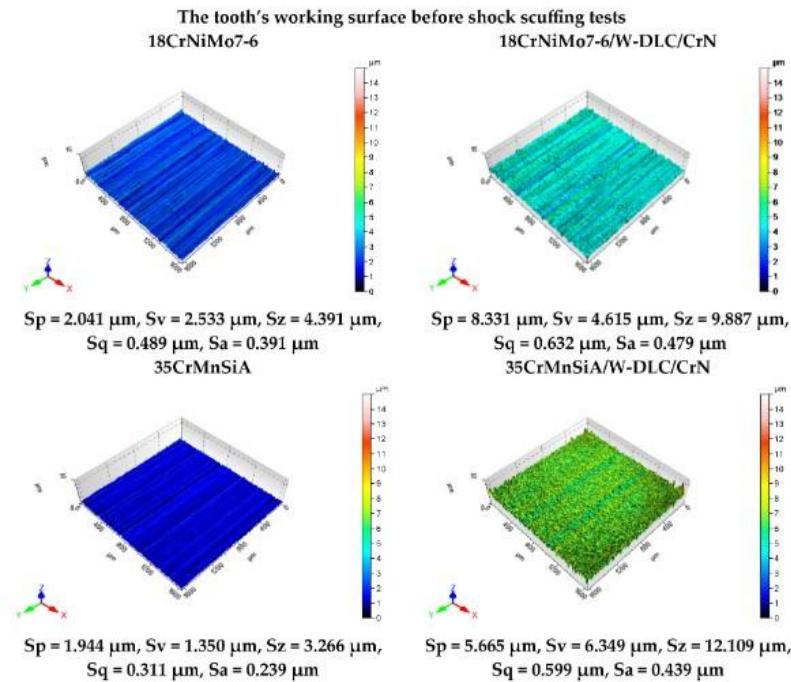
Istotnym kierunkiem rozwoju współczesnych konstrukcji jest rosnące zastosowanie metod kształtowania warstw powierzchniowych z wykorzystaniem powłok cienkowarstwowych przy użyciu metod chemicznych (osadzanie z fazy gazowej CVD) i metod fizycznych (osadzanie z fazy gazowej PVD). Powłoki te charakteryzują się wysoką odpornością na zużycie i dużą twardością [21, 38, 50]. Decyzja o zastosowaniu powłok w węzłach tarcia podejmowana przez producentów dotyczy przede wszystkim zwiększenia trwałości eksploatacyjnej oraz poprawy zdolności przenoszenia obciążeń, w tym w szczególności obciążeń kontaktowych i sił tarcia. Dążenie do osiągnięcia tych celów skłania inżynierów i konstruktorów do modyfikacji budowy komponentów poprzez odpowiednie kształtowanie warstwy powierzchniowej elementów współpracujących. Działania te mają na celu ograniczenie ryzyka uszkodzeń węzłów tarcia, degradacji ich właściwości użytkowych oraz przyspieszonego zużycia. Właściwości tribologiczne węzłów tarcia są w istotnym stopniu determinowane przez strukturę i właściwości warstw powierzchniowych. Do kluczowych, pożądanых cech warstw ukształtowanych na elementach ciernych należą wysoka odporność na zużycie ścierne i zmęczeniowe, odporność na inicjację i propagację pęknięć, odpowiednia adhezja powłoki do podłoża, wysoka twardość oraz stabilność właściwości mechanicznych w warunkach obciążeń eksploatacyjnych [19, 63].

W kontekście optymalizacji właściwości warstw powierzchniowych oraz oceny skuteczności stosowanych powłok ochronnych istotne znaczenie mają wyniki badań eksperymentalnych prowadzonych w warunkach zbliżonych do rzeczywistej pracy. Autorzy [91] badali wpływ obciążenia zestawu kół zębatych na powstawanie uszkodzeń powierzchni zębów kół zębatych z powłoką DLC. Analizowano powierzchnie robocze zębów kół zębatych walcowych po testach zacierania udarowego, co umożliwiło ocenę mechanizmów degradacji kół w funkcji obciążenia. Do badań wykorzystano koła zębate



Rysunek 2.12. Wyniki badań kształtowania się powierzchni roboczej zęba przed i po testach ścierania udarowego AFM [91]

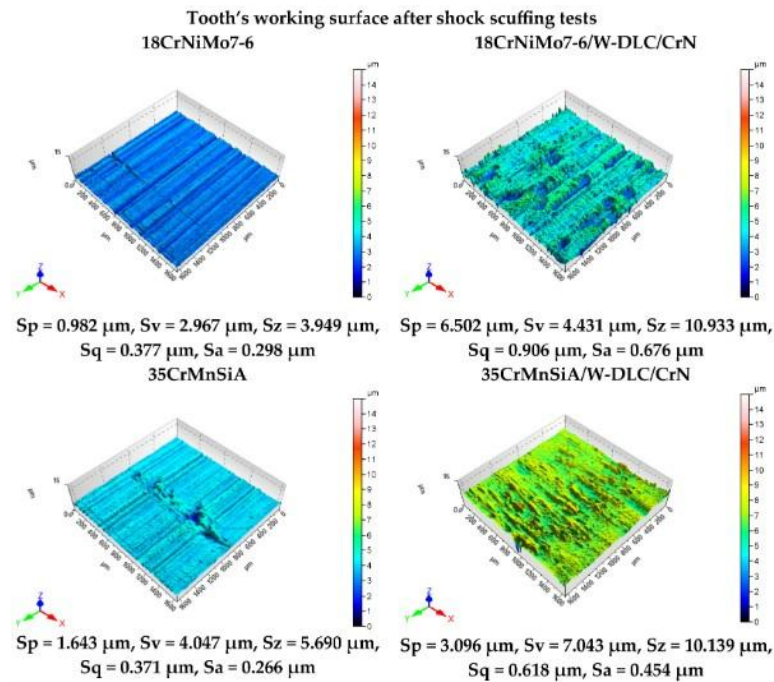
wykonane ze stali 35CrMnSiA oraz 18CrNiMo7-6, z zębami pokrytymi powłoką W-DLC/CrN. Analizie poddano stan powierzchni zębów przed oraz po przeprowadzonych badaniach (rys. 2.12). Stwierdzono, że powierzchnia zęba ze stali 35CrMnSiA z powłoką W-DLC/CrN uległa znacznemu uszkodzeniu. Zaobserwowano liczne wżery oraz spore ubytki. Podobny charakter zużycia odnotowano również dla materiału 35CrMnSiA bez powłoki. W przypadku stali 18CrNiMo7-6 pokrytej powłoką, po jej zużyciu widoczne były ślady obróbki wykończeniowej, co wskazuje na mniejszy stopień degradacji podłoża. Natomiast w wyniku procesu docierania ślady polerowania uległy zatarciu na powierzchni zębów wykonanych z tej stali [91]. Autorzy dokonali analizy parametrów chropowatości powierzchni: S_p (maksymalna wysokość wzniesień), S_v (maksymalna głębokość wgłębień), S_z (maksymalna wysokość powierzchni), S_a (arytmetyczna średnia wysokość powierzchni) oraz S_q (średnia kwadratowa wysokość powierzchni) (rys. 2.13-2.14).



Rysunek 2.13. Topografia powierzchni roboczej zęba przed testami ścieralności udarowej [91]

Warstwa powierzchniowa zębów koła zębatego wykonanego ze stali 18CrNiMo7-6 po badaniach zacierania charakteryzowała się najniższymi wartościami analizowanych parametrów chropowatości. Natomiast najwyższe wartości parametru chropowatości powierzchni Sz, przekraczające $10 \mu\text{m}$, zaobserwowano dla powierzchni pokrytych powłoką, zarówno w przypadku stali 18CrNiMo7-6, jak i 35CrMnSiA. Najwyższą wartość parametru chropowatości powierzchni Sv wynoszącą $7,043 \mu\text{m}$, odnotowano dla próbki ze stali 35CrMnSiA z powłoką. Zmiany te świadczą o znacznym rozwoju uszkodzeń powierzchniowych o charakterze adhezyjno-ściernym, prowadzących do powstawania głębokich wgłębień i lokalnej degradacji warstwy wierzchniej w porównaniu ze stanem sprzed badań tribologicznych [91, 123]. Przeprowadzone badania wykazały, że koła zębate wykonane ze stali 35CrMnSiA, pokryte powłoką W-DLC/CrN, ulegały zacieraniu pod wpływem obciążeń udarowych. Natomiast powierzchnie zębów kół zębatych wykonanych ze stali 18CrNiMo7-6, pokryte tą powłoką, nie wykazywały śladów uszkodzeń nawet przy maksymalnych obciążeniach. Wyniki te wskazują, że skuteczność zastosowania powłoki W-DLC/CrN jest silnie uzależniona od właściwości materiału podłoża koła zębatego. W przypadku stali o niższej odporności na obciążenia udarowe, powierzchnie robocze zębów ulegały uszkodzeniom i wykazywały ślady zużycia pomimo obecności powłoki ochronnej. Uzyskane wyniki wskazują, że skuteczność zastosowania powłok ochronnych w istotnym stopniu zależy nie tylko od właściwości fizykochemicznych powłoki, ale również od materiału podłoża

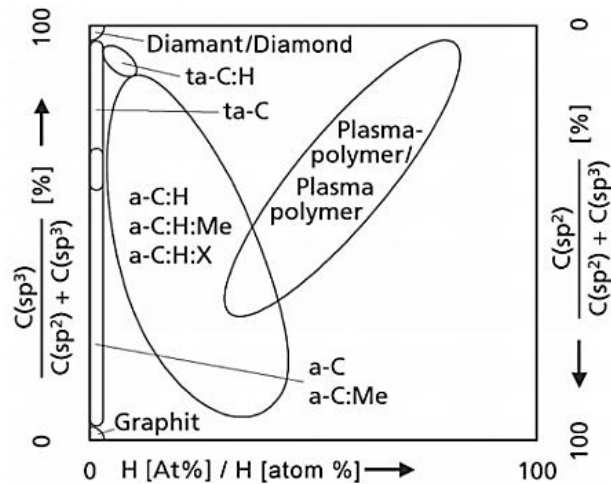
oraz warunków obciążenia, co należy uwzględnić w procesie wyboru kształtowania warstwy powierzchniowej elementów węzłów tarcia [91].



Rysunek 2.14. Topografia powierzchni roboczej zęba po testach ścierania udarowego [91]

2.3.1. Powłoki węzłów tarcia z warstwą węgla amorficznego

Powłoki a-C:H wykazują właściwości zbliżone do diamentu, jednak ich amorficzna struktura odróżnia je od diamentu krystalicznego [77]. Charakteryzują się niskim współczynnikiem tarcia oraz wysoką biokompatybilnością, co predysponuje je również do zastosowań w węzłach tarcia mających kontakt z tkankami biologicznymi [103]. Powłoki amorficznego węgla często zawierają dodatki pierwiastków stopowych, takich jak azot, wodór, krzem, bor, chrom czy fluor. Ich struktura metalograficzna stanowi mieszaninę faz o hybrydyzacji sp^2 oraz sp^3 , co determinuje ich podstawowe właściwości mechaniczne i tribologiczne i są zaliczane do grupy powłok diamentopodobnych DLC. Udział wiązań sp^2 i sp^3 oraz obecność wodoru decydują o klasyfikacji i właściwościach użytkowych poszczególnych typów powłok DLC [16, 19]. Do głównych zalet powłok diamentopodobnych DLC należą: wysoka twardość, niski współczynnik tarcia, duża odporność na zużycie ścierne, obojętność chemiczna oraz biokompatybilność [76, 118]. Dodatkową zaletą jest niewielka grubość powłok, która nie wymaga obróbki wykończeniowej po ich naniesieniu oraz umożliwia zachowanie wymiarów geometrycznych elementów współpracujących uzyskanych w poprzedniej obróbce kształtującej.



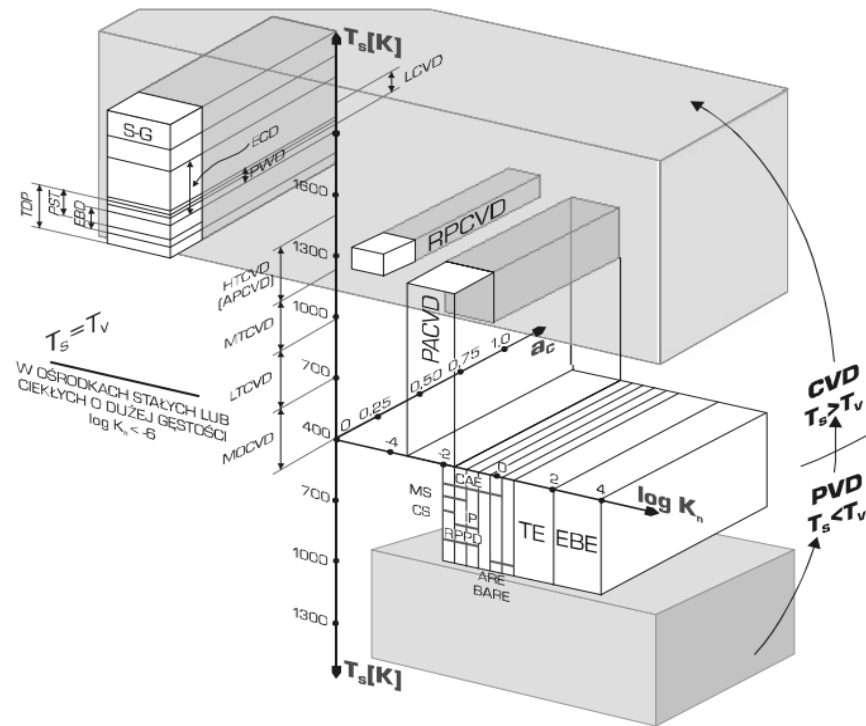
Rysunek 2.15. Typy węgla amorficznego [25]

Wyróżnia się powłoki bezwodorowego węgla amorficznego (a-C, ta-C) oraz powłoki uwodornionego węgla amorficznego (a-C:H, ta-C:H), a także powłoki modyfikowane dodatkami, takie jak a-C:H:Me (z domieszką metalu) oraz a-C:H:X (z domieszką niemetalu). Odpowiedni dobór rodzaju powłoki stanowi kluczowy czynnik w kształtowaniu właściwości tribologicznych, uzależnionych od warunków pracy pary ciernej. W zależności od zawartości wodoru oraz udziału wiązań sp^2 i sp^3 wyróżnia się różne typy węgla amorficznego (rys. 2.15) [25].

Ze względu na korzystne właściwości mechaniczne (niski współczynnik tarcia, wysoka twardość), chemiczne (wysoka odporność korozyjna i chemiczna) oraz fizyczne (gładka, amorficzna struktura), powłoki DLC znajdują szerokie zastosowanie w różnych urządzeniach. W inżynierii mechanicznej stosuje się je w narzędziach skrawających i szlifierskich, w elementach mechanicznych o wysokim obciążeniu, takich jak koła zębate, tłoki, sprzęgła i mechanizmy różnicowe w silnikach spalinowych. Ponadto powłoki te wykorzystywane są w aparaturze medycznej, w tym w implantach i przyrządach chirurgicznych, a także w komponentach wymagających precyzyjnej ochrony powierzchni, takich jak dyski twarde [23].

Podstawową klasyfikacją metod nanoszenia powłok z fazy gazowej są dwa parametry:

- parametr Knudsena K_n (określany wzorem $K_n = \lambda_f / D_r$,
- temperatura podłoża T_s , K (rys. 2.16) [6, 19].

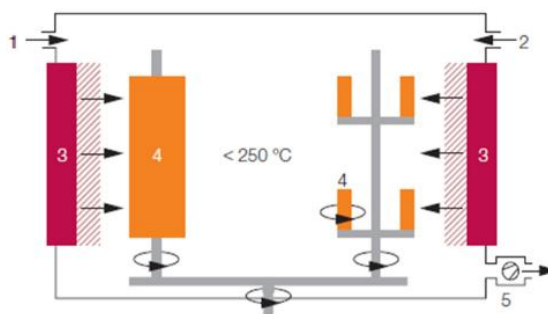


Rysunek 2.16. Klasyfikacja metod i technik osadzania powłok z fazy gazowej PVD i CVD; temperatura powierzchni podłoża T_s , temperatura kinetyczna fazy gazowej T_v , parametr Knudsen Kn [89]

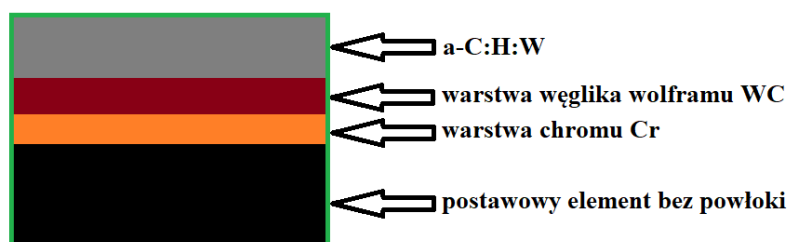
Parametr Knudsen to stosunek swobodnej drogi λ_f jonów i atomów biorących udział w konstituowaniu powłoki oraz charakterystycznego rozmiaru D reaktora, gdzie ta powłoka będzie wytwarzana [89]. Uwzględniając te parametry, możliwe jest zaprojektowanie procesu technologicznego pozwalającego na stworzenie wymaganego procesu nanoszenia powłoki z fazy gazowej. Wraz z rozwojem techniki kształtowania cienkowarstwowych powłok, opracowano kilkanaście metod ich nanoszenia na warstwy powierzchniowe elementów konstrukcyjnych.

Najczęstsze metody stosowane w procesach wytwórczych to osadzanie fizyczne z fazy gazowej PVD i chemiczne CVD oraz procesy hybrydowe. Aby nanieść powłokę a-C:H:W na wybrany element konstrukcyjny [15, 71, 75], muszą zostać spełnione pewne wymogi procesowe. Proces osadzania powłoki rozpoczyna się od oczyszczenia powierzchni wybranego elementu węzła ciernego, np. koła zębatego, tłoka lub tulei, zwykle przez odłuszczenie i trawienie chemiczne, a następnie jego zamocowania w komorze próżniowej na specjalnym oprzyrządowaniu. Element jest nagrzewany i poddawany trawieniu jonowemu przy użyciu jonów argonu. W dalszym etapie procesu do źródła materiału powłoki przyłożony jest wysoki ujemny potencjał elektryczny, co inicjuje wyładowanie gazowe i powstanie jonów dodatnich argonu. Jony te powodują

odparowanie materiału osadzanego i wytworzenie strumienia cząstek kierowanych w stronę osadzanego podłoża. Do komory wprowadzany jest również gaz reaktywny, zawierający cząstki niemetaliczne powłoki, który reagując z rozpylonymi cząstkami materiału źródłowego, prowadzi do osadzenia cienkiej warstwy powłoki a-C:H:W. Węgiel w powłoce pochodzi z gazu reaktywnego, natomiast wolfram jest dostarczany ze źródła odparowania. Aby zapewnić równomierne rozmieszczenie powłoki na powierzchni elementu, jest on obracany w kilku osiach na oprzyrządowaniu roboczym (rys. 2.17) [89].



Rysunek 2.17. Schemat procesu PVD: 1 – argon, 2 – gaz reaktywny, 3 – źródło materiału powłoki, 4 – elementy pokrywane powłoką, 5 – pompa podciśnienia [89]



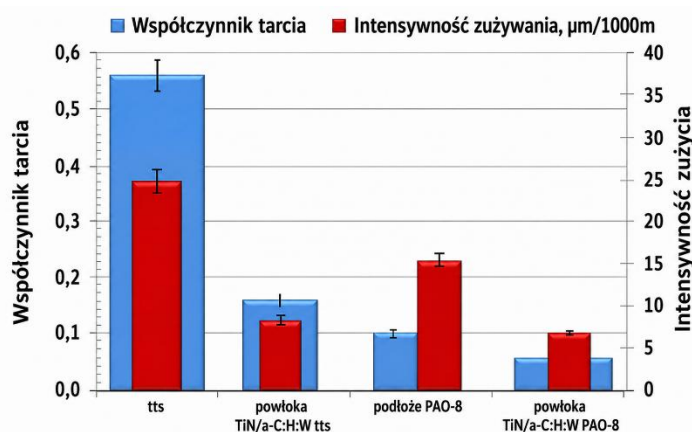
Rysunek 2.18. Budowa powłoki a-C:H:W [73]

Powłokę a-C:H:W kształtuje się na materiale podłoża (najczęściej stalowym) z dodaniem warstwy chromu Cr (ogranicza naprężenia wewnątrz powłoki oraz zwiększa adhezję), twardego węgliku wolframu (WC) i właściwej powłoki a-C:H:W (rys. 2.18). W wyniku zastosowania relatywnie niskiej temperatury procesu osadzania powłoki (do 250 °C) podłoże stalowe nie zmienia istotnie swoich właściwości ukształtowanych w poprzednim procesie [73].

2.4. Właściwości tribologiczne powłok węglowych

Powłoki z węgla amorficznego są stosowane w węzłach tarcia ze względu na swoje korzystne właściwości tribologiczne. W jednym z badań analizowano

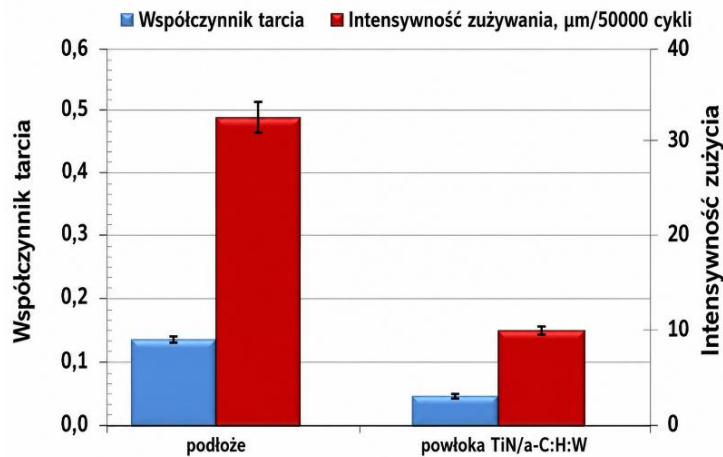
powszechnie stosowaną stal szybko tnącą HS6-5-2C, charakteryzującą się korzystnymi właściwościami przeciwzużyciowymi w węzłach tarcia pracujących zarówno w warunkach smarowania, jak i bez udziału środka smarnego. Do prób porównawczych wybrane trzpienie oraz tarcze ze stali HS6-5-2C pokryto powłoką a-C:H:W z międzywarstwą TiN, z zastosowaniem metody PVD [47]. Powłoki a-C:H:W wytworzono w procesie osadzania w temperaturze do 250°C, natomiast powłokę TiN otrzymano metodą odparowania łukowego w temperaturze 500°C. Podczas badań autorzy użyli testera tribologicznego T-01M oraz testera T-17. W testerze T-01M skojarzono w parze trącej: kulkę ze stali 100Cr6 i tarcze ze stali HS6-5-2C oraz tarcze ze stali HS6-5-2C z powłoką a-C:H:W lub TiN/a-C:H:W, a obszar tarcia smarowano środkiem smarnym PAO-8 [73].



Rysunek 2.19. Współczynnik tarcia oraz intensywności zużycia stali oraz powłok podczas użycia środka smarnego PAO-8 [73]

W wynikach badań tribologicznych autorzy stwierdzili zdecydowanie wyższe wartości współczynnika tarcia oraz intensywniejsze zużycie materiału stalowego HS6-5-2C w porównaniu do powłoki DLC. Zastosowanie wybranego środka smarnego PAO-8 znacząco poprawiło właściwości tribologiczne. Intensywność zużycia tarczy stalowej w próbie tarcia suchego wyniosła 25 $\mu\text{m}/1000\text{m}$, natomiast w próbie z zastosowaniem środka smarnego zmniejszyła się do 16 $\mu\text{m}/1000\text{m}$ (rys. 2.19).

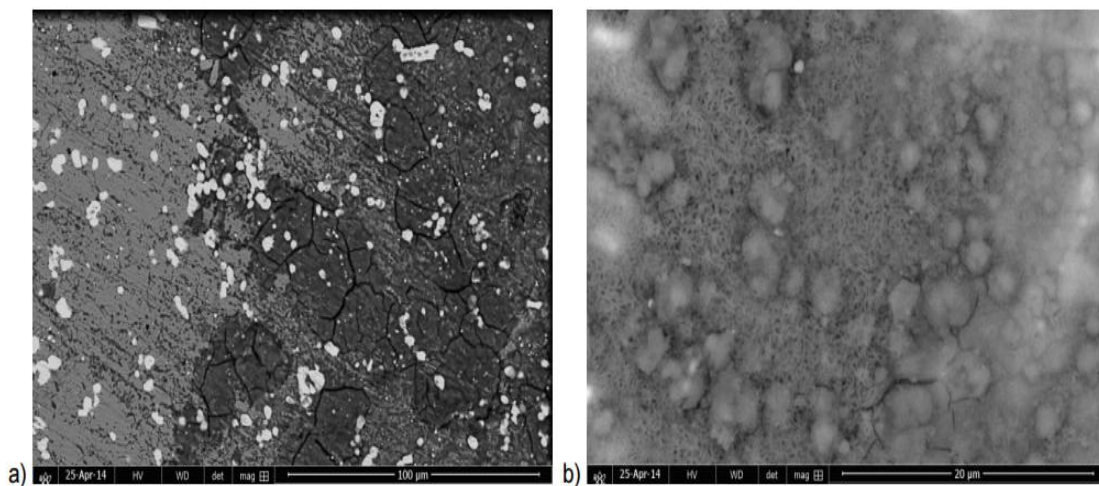
Pomiary zużycia powłoki TiN/a-C:H:W w próbie tarcia suchego wykazały wytarcie 9 μm , a w próbie z wykorzystaniem środka smarnego PAO-8 – 7 μm (zaobserwowana różnica to ponad 50% mniejsze zużycie powłoki w porównaniu do próbki stalowej). Powłoka TiN/a-C:H:W wykazała również znacznie mniejsze wartości współczynnika tarcia w porównaniu podłoża ze stali HS6-5-2C (rys. 2.20) [73]. Ukształtowane powłoki posiadają znacznie korzystniejsze właściwości tribologiczne,



Rysunek 2.20. Współczynnik tarcia, intensywności zużycia powłok oraz stali podczas smarowania PAO-8 [73]

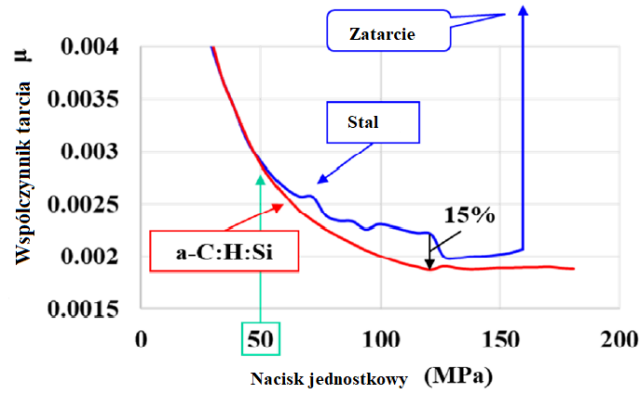
zarówno podczas tarcia suchego jak i tarcia z smarowaniem olejem PAO-8, w porównaniu do próbek stalowych bez powłok.

Badania na obu testerach wykazały najniższy współczynnik tarcia dla powłoki TiN/a-C:H:W przy smarowaniu olejem, w skojarzeniu z trzpieniem ze stali HS6-5-2C, który pracował w ruchu posuwisto-zwrotnym (tester T-17) [73]. Autorzy przeprowadzili również testy korozyjne, używając do ich przeprowadzenia roztworu 3% NaCl w temperaturze około 20°C.



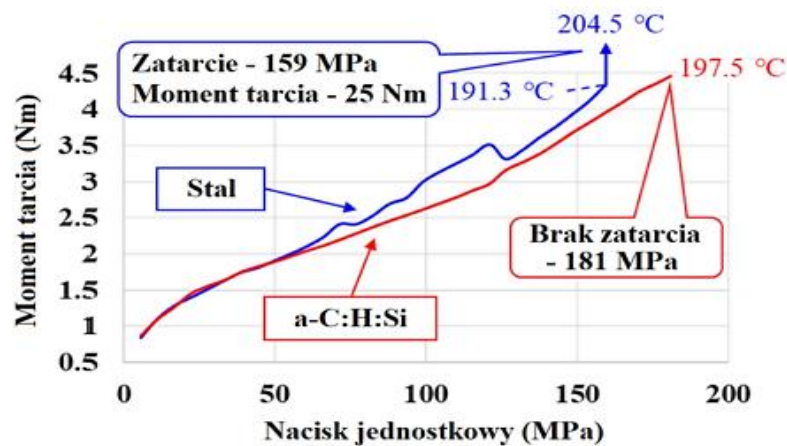
Rysunek 2.21. Obrazy SEM uszkodzeń po testach korozyjnych dla: a) podłoża oraz b) powłoki TiN/a-C:H:W [73]

Obrazy po próbach korozji wykazały, iż próbki stalowe posiadają w warstwie powierzchniowej pęknięcia i wżery korozyjne, natomiast warstwa powierzchniowa próbek z powłoką TiN/a-C:H:W wykazuje mniejszą ilość uszkodzeń, a zarazem są również mniejsze w porównaniu z próbką stalową (rys. 2.21) [73].



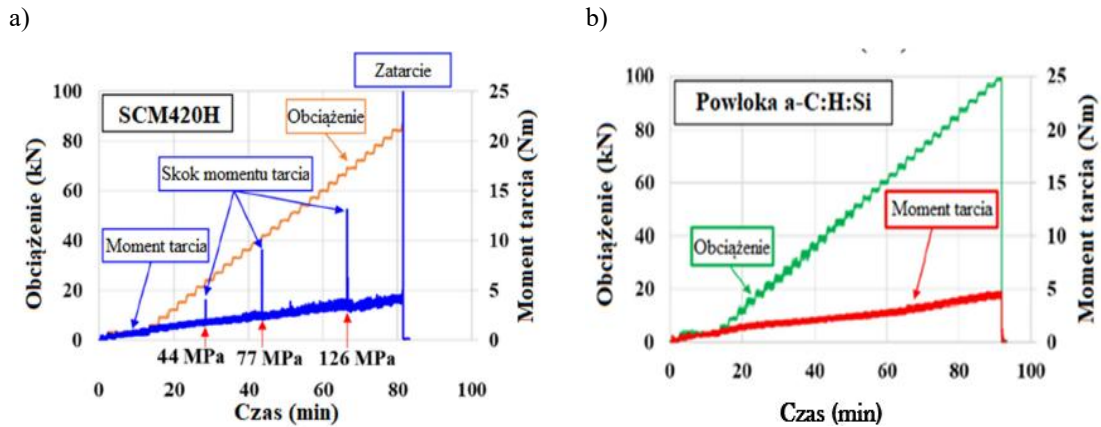
Rysunek 2.22. Zmiana współczynnika tarcia przy różnym obciążeniu [47]

Autorzy kolejnej publikacji badali pary cierne typu czop wału, łożysko ślizgowe oraz olej silnikowy jako środek smarny, porównując pary cierne z czopem stalowym i z powłoką a-C:H:Si [47]. Podczas prób rejestrowano zmianę współczynnika tarcia przy zmiennym obciążeniu. Przy jednostkowych naciskach w obszarze styku pary ciernej z powłoką a-C:H:Si powyżej 50 MPa otrzymano znaczne zmniejszenie wartości współczynnika tarcia, a przy nacisku 121 MPa redukcja oporów tarcia wyniosła 15% (rys. 2.22).



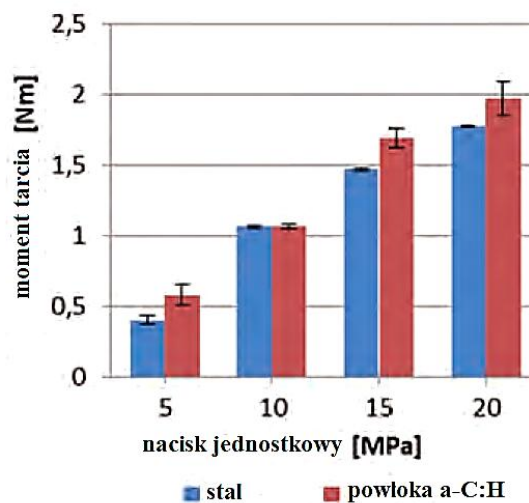
Rysunek 2.23. Moment tarcia par ciernych z czopem bez powłoki oraz z powłoką a-C:H:Si [47]

Podczas badań węzła tarcia z próbką stalową, wystąpiły skokowe wzrosty momentu tarcia dla nacisków jednostkowych wynoszących kolejno 77 i 126 MPa. Świadczy to o chwilowym zacieraniu się węzła tarcia. Ostatni odczyt wzrostowy przy nacisku 159 MPa doprowadził do zatarcia pary z czopem stalowym (rys. 2.23). W przypadku czopa stalowego, temperatura przed zatarciem wynosiła 191,3°C i wzrosła do 204,5°C w momencie zatarcia. Dla czopa z powłoką, temperatura wzrosła do 197,5°C, jednak



Rysunek 2.24. Moment tarcia w skojarzeniu ciernym w funkcji czasu trwania próby: a) z próbkami stalowymi, b) z próbkami z powłoką a-C:H:Si [47]

zatarcie nie nastąpiło, pomimo uzyskania nacisku jednostkowego 181 MPa [47] (rys. 2.24). Podczas badań zarejestrowano moment tarcia w funkcji czasu i obciążenia, który wykazał niestabilny przebieg przy użyciu próbki stalowej objawiający się skokowymi wzrostami momentu tarcia poprzedzającymi zatarcie, natomiast przy użyciu próbki z powłoką a-C:H:Si moment tarcia wzrastał w sposób stabilny, bez oznak zacierania, pomimo osiągnięcia wyższego obciążenia (rys. 2.24) [47].

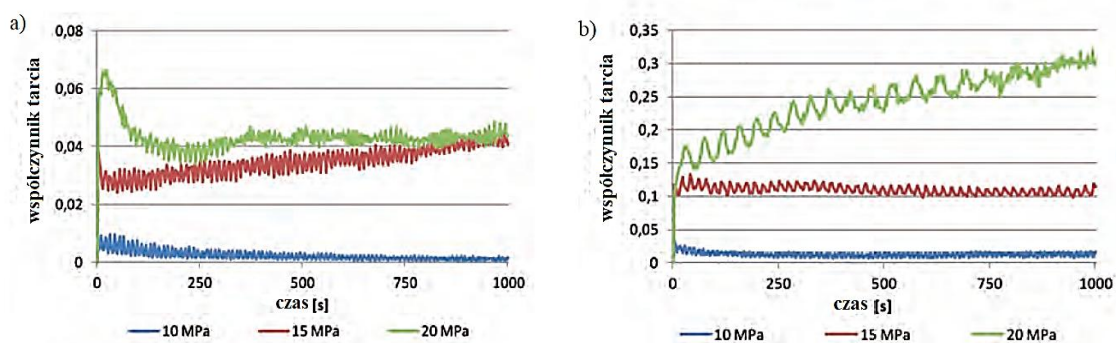


Rysunek 2.25. Moment tarcia podczas rozruchu pary cieiernej smarowanej olejem 10W40 biodegradowalny [66]

W kolejnej publikacji autorzy analizowali właściwości tribologiczne pary cieiernej z powłoką a-C:H, przy smarowaniu węzła tarcia biodegradowalnym olejem silnikowym klasy 10W40 [66]. Do prób użyto elementów pierścieniowych ze stali AISI 4337. Na elementy te nałożono powłokę a-C:H metodą PVD [66]. Badanie stanowiskowe zostały zrealizowane na testerze tribologicznym T-05, pod naciskiem jednostkowym 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa, 20 MPa. Wyniki pomiaru maksymalnego momentu tarcia

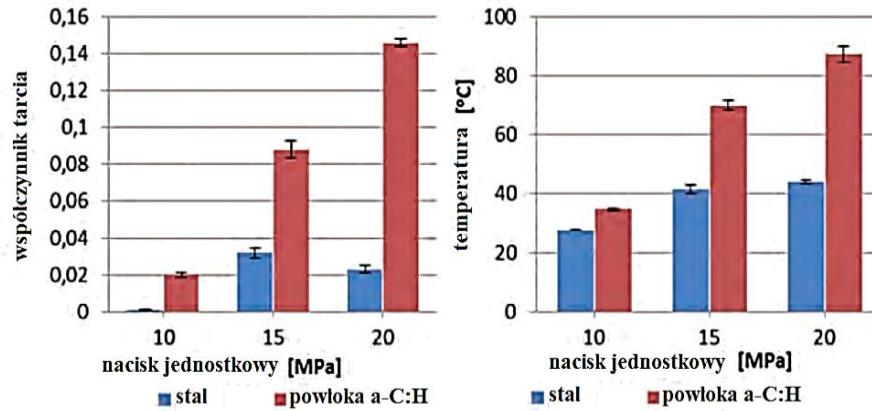
w fazie rozruchu pary cierniej wykazały, iż jedynie przy 10 MPa wartość momentu tarcia była podobna dla obu próbek pierścieniowych stalowej i z powłoką (wartości około 1,05 MPa), natomiast przy innych naciskach jednostkowych, moment rozruchowy jest znacząco wyższy w parach ciernych z próbkami pokrytymi powłoką a-C:H. W badaniu przy sile nacisku 5 MPa różnica wyniosła 0,2 MPa, przy sile nacisku 15 MPa różnica wyniosła 0,25 MPa, przy sile nacisku 20 MPa różnica wyniosła 0,3 MPa (rys. 2.25).

Pomiary współczynnika tarcia wykazały również jego wyższą wartość w parach ciernych z powłoką węglową niż w parach ciernych z próbkami stalowymi. Wartości współczynnika tarcia w parach ciernych z stalową powierzchnią, przy obciążeniach 10-20 MPa wzrastały w momencie rozruchu, natomiast malały wraz z czasem trwania testu (rys. 2.26).

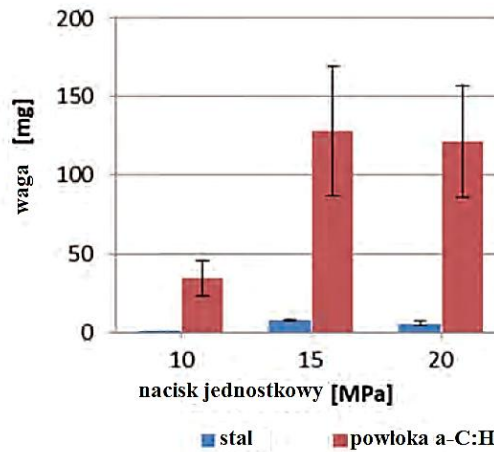


Rysunek 2.26. Współczynnik tarcia w parze cierniej z próbką: a) stalową, b) z powłoką a-C:H [66]

W parach ciernych z próbkami pokrytymi powłoką a-C:H, przebieg współczynnika tarcia był podobny do tego przebiegu dla pary z próbką stalową dla obciążenia 10 MPa, przy czym w parze cierniej z powłoką a-C:H był wyższy (około 0,02), niż w parze z próbką stalową (0,01). Przy obciążeniu 15 MPa, współczynnik tarcia w parze cierniej z powłoką a-C:H ustabilizował się zaraz po rozpoczęciu testu przy wartości około 0,1, a przy nacisku 20 MPa współczynnik tarcia wzrastał do końca badania osiągając wartości 0,3 (rys. 2.26). Zarejestrowane wartości współczynnika tarcia i temperatury w obszarze styku pod koniec próby zużycia pozwalają na określenie warunków pracy pary cierniej w zależności od obciążenia węzła tarcia. Oba te parametry były wyższe w parach ciernych z powłoką a-C:H niż w parach ciernych z próbkami pierścieniowymi stalowymi. Największa różnica została odnotowana dla współczynnika tarcia przy nacisku jednostkowym 20 MPa – była aż sześciokrotnie niższa w parze cierniej z próbką stalową niż w parze cierniej z próbką z powłoką (rys. 2.27).



Rysunek 2.27. Współczynnik tarcia oraz temperatura w parze ciernej w zależności od nacisków jednostkowych [66]



Rysunek 2.28. Zużycie wagowe stopu łożyskowego SAE 48 [66]

W badaniach przy sile nacisku 15 MPa współczynnik tarcia był około 2,5 razy niższy w parze ciernej z pierścieniem stalowym niż w skojarzeniu ciernej z powłoką (około 0,03 dla stali oraz 0,085 dla a-C:H) (rys. 2.27). Pomiar temperatury w obszarze styku pary ciernej, wykazywał podobne zmiany do zmian wartości współczynnika tarcia. Można było zauważyć wyższe wartości w parach ciernych z próbkami pierścieniowymi z powłoką (rys. 2.27). Przy nacisku 15 MPa, temperatura w obszarze tarcia była około 70% wyższa w par ciernych z powłoką, niż w parach ciernych z pierścieniem stalowym, a przy 20 MPa różnica wynosiła już 95%. Przy obciążeniu 10 MPa, temperatura była około 25% wyższa w parach z powłoką (35°C w parach z powłoką i 25°C w parach bez powłoki węglowej) [57]. Obliczone zużycie wagowe przeciwpróbek ze stopu łożyskowego SAE 48 wykazało istotną różnicę w zużyciu stopu w parze ciernej z powłoką, która była około 20-krotnie większa niż w parze ciernej z próbka stalową (rys. 2.28).

Tabela 2.3. Chropowość próbek pierścieniowych przy nacisku jednostkowym 20 MPa po zakończonym teście [66]

Parametr	Stalowa		Powłoka a-C:H	
	Wartość [μm]	Różnica [%]	Wartość [μm]	Różnica [%]
Ra	0,164	-27	0,232	-10
Rz DIN	1,63	-19	1,72	-32
RSm	34,4	14	32,2	-0,3

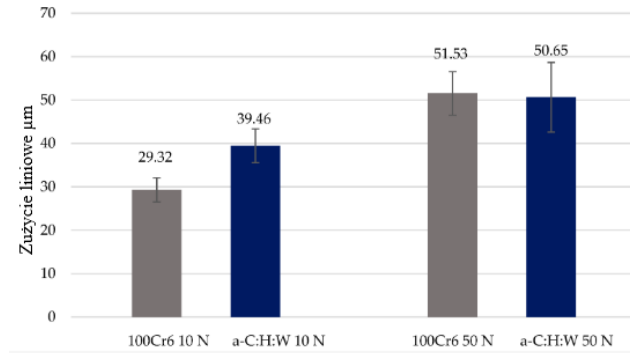
Pomiary chropowości powierzchniowej próbek pierścieniowych po teście zużycia wykazały znaczące zmniejszenie wybranych parametrów chropowości w porównaniu do pomiarów przed testami. Parametr chropowości powierzchni Ra zmniejszył się o 27% na próbce stalowej oraz 10% na próbce z powłoką a-C:H (tab. 2.3) [66]. Natomiast parametr chropowości Rz obniżył się o 19% na próbce stalowej oraz o 32% na próbkę z powłoką. Pomiar parametru chropowości powierzchni RSm wykazał wzrost wartości o 14% na próbce stalowej, oraz stabilizację na próbce z powłoką a-C:H (tab. 2.3).

Tabela 2.4. Chropowość przeciwpółek przy nacisku jednostkowym 20 MPa po zakończonym teście [66]

Parametr	Stal		Powłoka a-C:H	
	Wartość [μm]	Różnica [%]	Wartość [μm]	Różnica [%]
Ra	0,284	-33	0,317	-25
Rz DIN	3,21	-31	4,47	-3
RSm	100,1	48	66,5	-2

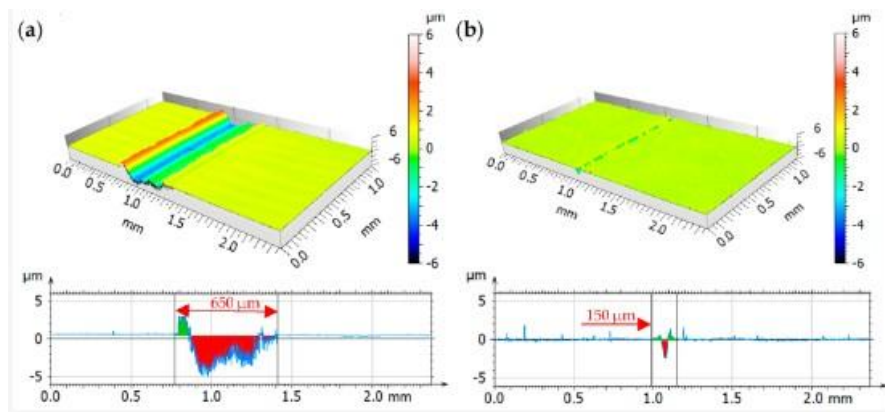
Chropowość powierzchni przeciwpółek z stopu łożyskowego SAE 48 również wykazała znaczne spadki mierzonych parametrów (tab. 2.4). Najmniejsze zmiany zaobserwowano dla parametru chropowości powierzchni Rz, który zmniejszył się o 31% w styku z próbką stalową, oraz jedynie o 3% w styku w parze ciernej z próbką z powłoką a-C:H. Parametr chropowości powierzchni Ra wykazał większą zmianę chropowości powierzchni o 33% w styku w parach ciernych z próbką stalową oraz o 25% w skojarzeniach ciernych z powłoką węglową. Istotną zmianę obserwowano dla parametru chropowości powierzchni RSm po badaniach z próbkami stalowymi i zarejestrowano wzrost 48 %, a z ukształtowaną powłoką a-C:H tylko nieznaczny 2% (tab. 2.4). Autorzy w podsumowaniu badań stwierdzili, że współczynnik tarcia, temperatura w obszarze styku, zużycie stopu łożyskowego SAE 48 w parze ciernej

z próbką z powłoką a-C:H są znacząco wyższe niż w parze ciernej z próbkami stalowymi bez powłoki. Zaobserwowano również, że chropowatość powierzchni przeciwpróbek z stopu łożyskowego SAE 48 oraz pierścienia z ukształtowaną powłoką a-C:H wykazuje tendencję do zmniejszania się parametru Ra, Rz i RSm [66].



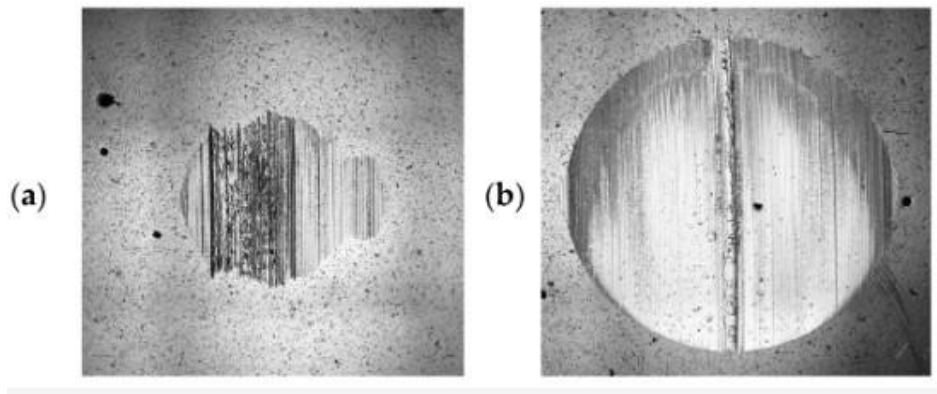
Rys. 2.29. Średnie wartości zużycia liniowego w naciskach 10N i 50N [101]

Właściwości tribologiczne powłoki a-C:H:W analizowano również w warunkach smarowania płynem obróbkowym w styku punktowym (ball on disc) [101]. Średnia wartość głębokości śladu zużycia po testach stanowiskowych na próbce z powłoką a-C:H:W przy obciążeniu 50 N była około 15 razy mniejsza w porównaniu do tarczy stalowej (rys. 2.29) [101].



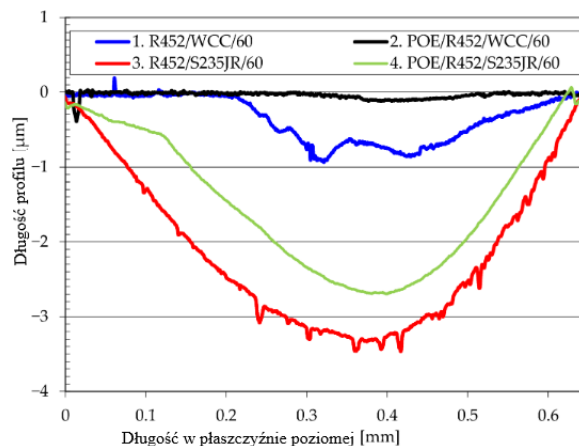
Rys. 2.30. Widoki izometryczne i przykłady profili powierzchni po testach tarcia z obciążeniem 50 N dla: a) stali 100Cr6 i b) powłoki a-C:H:W [101]

Widoki izometryczne śladu wytarcia przy obciążeniu 50 N wskazują na znacznie większe zużycie kulek ze stali, które jest ponad 4-krotnie wyższe niż w przypadku kulek z powłoką a-C:H:W (rys. 2.30). Potwierdzeniem korzystniejszych parametrów przeciwzużyciowych powłoki a-C:H:W były obrazy optyczne zużycia kulek (rys. 2.31). Przy obciążeniu 50 N ślad zużycia na próbce stalowej charakteryzował się około trzykrotnie większą szerokością i głębokością w porównaniu z próbką pokrytą powłoką a-C:H:W, co wskazuje na znacznie wyższą odporność tej powłoki na zużycie.



Rys. 2.31. Obrazy zużycia optycznego kulek po badaniu z obciążeniem 50 N: a) stal 100Cr6 i b) powłoka a-C:H:W [101]

Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowanie powłoki diamentopodobnej a-C:H:W przy obciążeniu 50 N prowadzi również do istotnego obniżenia współczynnika tarcia oraz redukcji zużycia, co potwierdzają mniejsze wartości głębokości i powierzchni śladów zużycia oraz wyniki analizy topografii powierzchni w porównaniu do stali 100Cr6 [101].

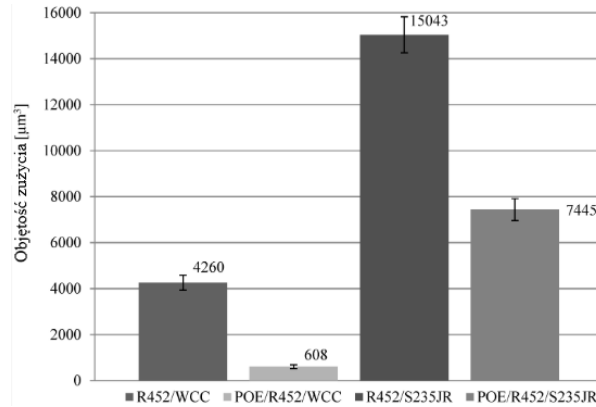


Rys. 2.32. Profile przekroju poprzecznego śladu zużycia [27]

W kolejnej pracy badawczej oceniono możliwość zastosowania powłoki a-C:H (WC/C) w parach ślizgowych sprężarek chłodniczych. Analizę przeprowadzono na podstawie przebiegów zużycia oraz wartości współczynnika tarcia uzyskanych podczas porównawczych badań tribologicznych. Podczas tych badań zastosowano do smarowania olej na bazie estrów polioliowych (POE) oraz czynnik chłodniczy R452, a próbki w parze ciernej były wykonane ze stali S235JR z powłoką WC/C oraz bez powłoki. Badania przeprowadzono pod stałym obciążeniem 60 N [27].

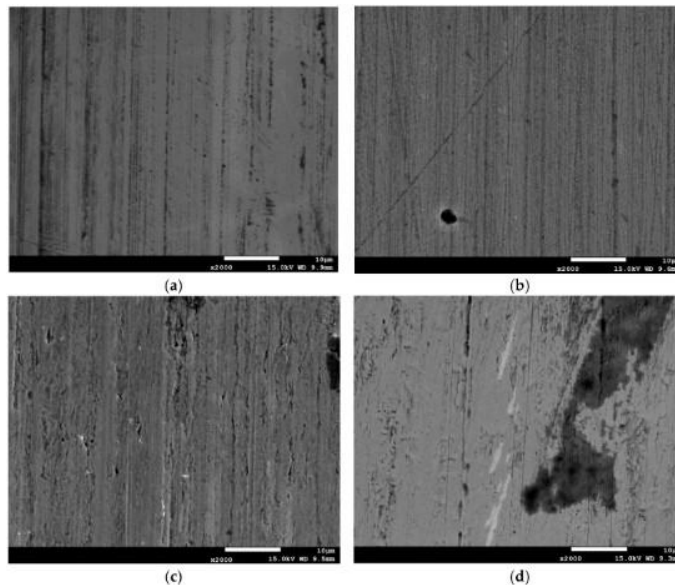
Analiza przekrojów poprzecznych śladu zużycia próbki z powłoką WC/C bez środka smarnego (seria 1) wykazała głębokość śladu wytarcia około 1 µm (rys. 2.32). Natomiast próbka z powłoką WC/C przy smarowaniu z użyciem mieszanki oleju

i czynnika chłodniczego wykazywała najmniejsze zużycie około $0,1 \mu\text{m}$ (seria 2). Zużycie próbki stalowej bez powłoki WC/C przy smarowaniu czynnikiem chłodniczym wyniosło $3,4 \mu\text{m}$ (seria 3) oraz około $2,6 \mu\text{m}$ przy smarowaniu z użyciem mieszanki oleju i czynnika chłodniczego (seria 4).



Rys. 2.33. Objętości zużycia próbek po testach [27]

Zużycie objętościowe próbek podczas tych prób wyniosło od 608 do $15043 \mu\text{m}^3$ i najniższe wartości zużycia odnotowano dla próbki z powłoką WC/C w parze smarowanej olejem POE i czynnikiem chłodniczym R452, natomiast najwyższe odnotowano w skojarzeniu z użyciem czynnika R452 i próbką ze stali S235JR. W obu skojarzeniach stosujących próbki z powłoką WC/C zużycie objętościowe było znacznie mniejsze w porównaniu do skojarzeń z próbkami ze stali S235JR (rys. 2.33) [27].



Rys. 2.34. Ślady zużycia warstwy powierzchniowej po testach próbek: a) R452/WCC, b) POE/R452/WCC, c) R452/S235JR, d) POE/R452/S235JR [27]

W celu identyfikacji mechanizmów zużycia materiału próbki stalowej oraz powłoki WC/C w zależności od warunków smarowania przeprowadzono obserwacje powierzchni śladów zużycia po próbach realizowanych przy smarowaniu wyłącznie

czynnikiem chłodniczym R452 oraz w warunkach ograniczonego smarowania olejem POE w obecności czynnika R452 (rys. 2.34). W przypadku próbek z powłoką WC/C autorzy wskazują, że siły tarcia nie spowodowały odwarstwienia powłoki od podłoża oraz nie zaobserwowano pęknięć ani wżerów. Charakter przebiegu zużycia wskazuje na dominujący mechanizm zużycia ściernego. W przypadku powierzchni próbek pokrytych WC/C zaobserwowano drobne rysy świadczące o zużyciu przy smarowaniu mieszaniną oleju i czynnikiem chłodniczym, natomiast szersze rysy powstały w wyniku tarcia w obecności samego czynnika R452. Na próbkach stalowych widoczne są głównie ślady bruzdowania, ale również przy smarowaniu tylko czynnikiem chłodniczym wystąpiły pojedyncze wżery (rys. 2.34). Zastosowana powłoka WC/C w tym układzie tribologicznym wykazuje mniejsze zużycie w warunkach niedostatecznego smarowania, niż zastosowanie tylko materiału stalowego, co wskazuje na wysoką skuteczność zastosowanej ochrony węzłów tarcia w tych warunkach tarcia.

2.5. Podsumowanie analizy literaturowej

Współczesne badania tribologiczne koncentrują się na ciągłej poprawie właściwości eksploatacyjnych komponentów maszyn i urządzeń poprzez zastosowanie technologii modyfikujących warstwy powierzchniowe stosowanych materiałów konstrukcyjnych i ukierunkowane są głównie na poprawę odporności przeciwzatarciowej oraz przeciwzużyciowej. W literaturze i praktyce inżynierskiej obserwuje się szerokie zastosowanie powłok tribologicznych na elementach maszyn i urządzeń. Powłoki te mogą być wytwarzane różnymi metodami fizycznymi i chemicznymi, co pozwala na uzyskanie wymaganych właściwości eksploatacyjnych i trwałościowych. Istotnym zagadnieniem pozostaje jednak dobór materiałowy pary tribologicznej do wymagań eksploatacyjnych, szczególnie w warunkach ograniczonego smarowania, co wpływa na kluczowe parametry pracy węzłów tarcia zarówno na etapie rozruchu węzła jak i procesy tarcia i zużycia podczas dalszej jego eksploatacji. Zwiększenie parametrów tribologicznych elementów z powłokami umożliwia wydłużenie ich trwałości eksploatacyjnej oraz redukcję strat energii wynikających z oporów tarcia. Modyfikacje warstwy powierzchniowej materiałów konstrukcyjnych znajdują również zastosowanie w inżynierii medycznej przy produkcji narzędzi, protez i implantów [8, 51, 52, 55, 79, 94, 104].

Środek smarny jest substancją, której zadaniem jest głównie redukcja tarcia w węzłach tribologicznych. W trakcie eksploatacji środki smarne ulegają degradacji,

co prowadzi do pogorszenia ich właściwości tribologicznych [56, 99, 106, 122]. Dobór oleju silnikowego jako środka smarnego może istotnie wpływać na pracę podzespołów silników spalinowych i stanowi kluczowy element zapewniający o jego trwałość i niezawodności [24, 97, 122]. Klasyfikacje olejów umożliwiają wybór oleju w oparciu o podstawowe parametry użytkowe, co zapewnia odpowiednie warunki smarowania w złożonych układach tribologicznych [35, 40, 44, 57]. Współcześnie to głównie oleje syntetyczne wytwarzane z bazowych komponentów poprzez syntezę i łączenie wybranych związków chemicznych są uznawane za najbardziej zaawansowaną technologicznie grupę olejów. Charakteryzują się korzystnymi właściwościami w niskich temperaturach, co przekłada się na skuteczne smarowanie w warunkach rozruchowych [97, 105, 111]. Zużycie oleju podczas eksploatacji prowadzi do pogorszenia jego właściwości tribologicznych, m.in. wskutek zanieczyszczeń oraz degradacji dodatków uszlachetniających o działaniu przeciwzatarciowym. W badaniach wykazano, że nawet niewielkie uzupełnianie świeżego oleju może istotnie wpływać na poprawę warunków pracy podzespołów oraz ich właściwości tribologicznych [114].

Kształtowanie powłok DLC jest powszechnie stosowane w inżynierii mechanicznej oraz inżynierii medycznej, a powłoki a-C:H:W są wykorzystywane przede wszystkim w elementach narażonych na zatarcie i zużycie. Powłoki z amorficznego węgla wykazują jednak pewne ograniczenia, do których należą m.in. obniżenie właściwości mechanicznych w przypadku nieprawidłowego procesu wytwarzania, możliwość pęknięcia w trakcie eksploatacji oraz degradacja właściwości w podwyższonych temperaturach [1, 10, 33, 54, 74]. W większości analizowanych publikacji pary cierne z powłokami węglowymi smarowane są nowymi olejami lub bez udziału środka smarnego. W przypadku rzeczywistych węzłów tarcia należy uwzględnić zużycie olejów podczas eksploatacji, wobec tego zastosowanie olejów po eksploatacji w badaniach stanowiskowych będzie generowało zmianę warunków tarcia wynikającą z degradacji pierwotnych właściwości oleju oraz występujących zanieczyszczeń, co będzie wpływało na procesy tarcia i zużycia [29, 66, 70, 82, 111].

Analiza dostępnej literatury wskazuje na ograniczoną liczbę badań dotyczących jednoczesnej oceny nowych i tych samych olejów eksploatowanych w skojarzeniach tribologicznych zarówno w skojarzeniach z próbkami stalowymi oraz z powłoką a-C:H:W. Stanowi to istotne ograniczenie w zakresie pełnej charakterystyki warunków smarowania oraz mechanizmów zachodzących w parach ciernych, co utrudnia ocenę wpływu tych układów na właściwości przeciwzatarciowe i przeciwzużyciowe.

Zastosowanie takich konfiguracji badawczych umożliwia poszerzenie wiedzy na temat właściwości eksploatacyjnych wybranych olejów silnikowych jako środków smarnych, przy jednoczesnym uwzględnieniu warunków zbliżonych do rzeczywistych warunków pracy układów tribologicznych stosowanych w silnikach spalinowych. Dodatkowo, w literaturze rzadko uwzględnia się podejście obejmujące pełny cykl badawczy, w którym oleje po eksploatacji w testach tribologicznych (np. w aparacie T-05) są następnie stosowane w kolejnych badaniach przeciwzatarciowych (np. T-02U), co pozwala na ocenę ich właściwości w warunkach zmienionej historii eksploatacyjnej. W analizowanych pracach zazwyczaj ograniczano się do pojedynczych etapów badań lub niewielkiej liczby wariantów olejów, podczas gdy kompleksowe podejście eksperymentalne prowadzące od 3 do 6 różnych stanów oleju w różnych warunkach eksploatacyjnych nie jest szeroko opisane w literaturze. Uwzględnienie takiego wieloetapowego cyklu badawczego pozwala na bardziej realistyczną ocenę degradacji oleju oraz jego wpływu na właściwości tribologiczne układu. W analizowanej literaturze nie zidentyfikowano prac obejmujących jednoczesną ocenę wpływu powłoki a-C:H:W w skojarzeniu z olejami silnikowymi o różnym stopniu degradacji w ramach jednolitego cyklu badawczego, uwzględniającego zarówno styki konforemne, jak i liniowe (niekonforemne). Podejście to odzwierciedla również działanie silnika spalinowego jako całości, gdzie olej funkcjonuje w obu typach kontaktów. Stanowi to kompleksową metodologię, badającą zachowanie oleju silnikowego w każdym kontakcie, co wpływa na różne cechy procesów tarcia. W dostępnych opracowaniach również w ograniczonym zakresie analizowano stan warstwy powierzchniowej elementów par ciernych po badaniach zużycia, a stanowi to istotny element oceny mechanizmów zużycia w styku ciernym. Uzyskane wnioski z analizy literatury stanowią podstawę do opracowania autorskiej metodyki badań tribologicznych, ukierunkowanej na kompleksową ocenę wpływu powłoki a-C:H:W na procesy tarcia i zużycia w warunkach zbliżonych do rzeczywistych procesów eksploatacji. Niedostateczna ilość takich badań ogranicza możliwość pełnej charakterystyki warunków smarowania oraz zachowania analizowanych par ciernych, a także utrudnia ocenę wpływu zastosowanych kompozycji materiałowych na ich właściwości przeciwzużyciowe i przeciwzatarciowe. Zidentyfikowane w literaturze ograniczenia stanu wiedzy stanowią uzasadnienie dla przeprowadzenia badań porównawczych dotyczących powłoki a-C:H:W w warunkach ograniczonego smarowania syntetycznymi olejami silnikowymi.

3. CEL, PROBLEM BADAWCZY, ZAKRES ROZPRAWY

Celem naukowym rozprawy doktorskiej jest wyznaczenie wpływu technologicznie ukształtowanej powłoki na bazie węgla amorficznego a-C:H:W (wytworzonej metodą PVD) na elemencie wężła tarcia oraz rodzaju i stanu oleju silnikowego, jako środka smarującego na procesy tribologiczne w styku konforemnym i niekonforemnym, w warunkach ograniczonego smarowania syntetycznymi olejami silnikowymi.

Jako cel praktyczny rozprawy przyjęto zwiększenie trwałości tribologicznej węzłów tarcia poprzez zastosowanie powłoki węglowej na jednym z elementów konstrukcyjnych tego wężła, w warunkach ograniczonego smarowania z wykorzystaniem nowych oraz przepracowanych olejów silnikowych, w tym pochodzących z rzeczywistego układu tribologicznego, jakim jest silnik spalinowy. Zastosowana procedura badawcza umożliwi przybliżenie warunków rzeczywistej eksploatacji, w których następuje stopniowa degradacja środka smarnego przy jednoczesnym jego dalszym użytkowaniu w układzie. Istotą przeprowadzonych badań jest ocena możliwości poprawy właściwości tribologicznych istniejących węzłów tarcia bez istotnej ingerencji w ich konstrukcję oraz wymiary geometryczne, przy jednoczesnym zachowaniu warunków smarowania typowych dla rzeczywistych zastosowań, z wykorzystaniem powszechnie stosowanych syntetycznych olejów silnikowych.

Problem badawczy obejmuje porównawcze badania tribologiczne węzłów tarcia smarowanych olejami silnikowymi, których celem jest określenie wpływu powłoki a-C:H:W wytworzonej metodą PVD oraz rodzaju oleju silnikowego na parametry procesu tarcia, w tym siłę tarcia, współczynnik tarcia oraz temperaturę w strefie styku wężła ciernego. Analizie poddane zostanie zużycie elementów wężła ciernego (zużycie liniowe i masowe) transformacja technologicznej warstwy wierzchniej w warstwę eksploatacyjną w oparciu o pomiar parametrów chropowatości powierzchni, a także zmiana właściwości przeciwtarciowych olejów silnikowych w wyniku procesów tribologicznych zachodzących w węźle tarcia.

W badaniach zastosowane zostaną trzy rodzaje olejów silnikowych: dwa oleje o klasie lepkości SAE 5W-30, z których jeden będzie olejem świeżym, natomiast drugi olejem po eksploatacji w silniku spalinowym pojazdu samochodowego. Trzecim środkiem smarnym będzie olej silnikowy SAE 5W-40, wybrany w celu oceny wpływu

klasy lepkości na właściwości tribologiczne analizowanych skojarzeń ciernych, powszechnie stosowany w eksploatacji jednostek napędowych.

W celu osiągnięcia założonych celów oraz rozwiązania sformułowanego problemu badawczego opracowano plan pracy, umożliwiający przeprowadzenie badań oraz sformułowanie wniosków wynikających z analizy literatury przedmiotu i badań własnych. Zakres pracy obejmuje:

- przegląd literatury krajowej oraz zagranicznej, dotyczącej konstrukcji węzłów tarcia, właściwości tribologicznych powłok przeciwwzyciowych i przeciwwzatarciowych ze szczególnym uwzględnieniem powłok na bazie amorficznego węgla, klasyfikacji i właściwości eksploatacyjnych olejów silnikowych stosowanych do smarowania parach ciernych w silnikach spalinowych,
- opracowanie metodyki badawczej skojarzeń tribologicznych pracujących w warunkach ograniczonego smarowania,
- przygotowanie próbek do badań stanowiskowych,
- przeprowadzenie badań tribologicznych par ciernych pracujących w styku konforemnym i niekonforemnym,
- przeprowadzenie badań właściwości przeciwwzatarciowych badanych olejów silnikowych,
- ocenę stanu warstwy powierzchniowej elementów pary cierniej,
- analizę uzyskanych wyników oraz określenie wpływu zastosowania ukształtowanych powłok na bazie amorficznego węgla a-C:H:W na procesy tribologiczne w badanych kompozycjach ciernych,
- podsumowanie wszystkich przedstawionych badań oraz zaprezentowanie najważniejszych wniosków.

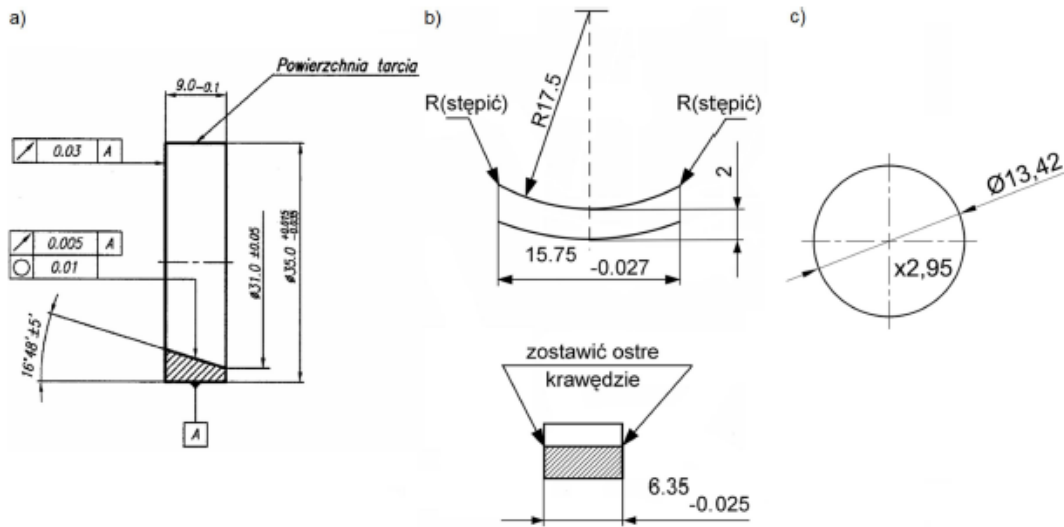
4. ZAŁOŻENIA PRZEPROWADZENIA BADAŃ WŁASNYCH

4.1. Obiekty badań własnych

W rozprawie doktorskiej obiektem badań były smarowane pary cierne o styku konforemnym i niekonforemnym, które składały się z elementów klocek i rolka pierścieniowa (rys. 4.1), odwzorowujące rzeczywiste układy konstrukcyjne występujące w silnikach spalinowym. W badaniach w styku konforemnym (rozłożonym) zastosowano stalowe próbki pierścieniowe (bez i z powłoką a-C:H:W), które tworzyły parę cierną z przeciwpróbką z stopu łożyskowego CuPb30. Przeciwpróbki z stopu łożyskowego CuPb30, o wymaganych wymiarach, wykonano z komercyjnej półpanewki łożyskowej w procesie obróbki skrawaniem (rys. 4.1). Badania w styku niekonforemnym (liniowym) zostały przeprowadzone z użyciem pary ciernej składającej się z próbki pierścieniowej stalowej i z komercyjnej stalowej płytki zaworowej (bez i z powłoką a-C:H:W). Węzły cierne podczas prób stanowiskowych badano w warunkach ograniczonego smarowania, z zastosowaniem trzech olejów silnikowych: nowy i używany olej syntetyczny o klasie lepkości SAE 5W30 (olej użyty w silniku spalinowym pojazdu samochodowego, po eksploatacji około 8000 kilometrów), oraz nowy syntetyczny olej silnikowy o klasie lepkości SAE 5W40:

- olej syntetyczny silnikowy SAE 5W-30 o specyfikacji API SN Plus, Chrysler MS-6395 oraz ILSAC GF-5 [36]. Olej silnikowy spełnia najnowszą normę olejową ILSAC GF-5. Olej opracowany został z myślą o poprawie osiągnięć w zakresie zużycia paliwa, emisji spalin, czystości silnika czy ochrony turbosprężarki w porównaniu z poprzednimi normami GF-4 (w pracy oznaczony, jako „5W30 NOWY”),
- olej syntetyczny silnikowy SAE 5W-30 O specyfikacji API SN Plus, Chrysler MS-6395 oraz ILSAC GF-5 – ten sam olej jak wymieniony wyżej, jednak po eksploatacji w silniku benzynowym o pojemności 6166 cm³, o wtrysku wielopunktowym (MPFI). Olej był eksploatowany przez około 8000 kilometrów (w pracy oznaczony, jako „5W30 ZUŻYTY”),
- olej syntetyczny silnikowy SAE 5W-40 o specyfikacjach API, SN/CF, ACEA A3/B4, VW 502.00, VW 505.00, BMW LL-01, MB-Approval 229.5, GM LL - B – 025, Porsche A40, RN0700/0710 oraz PSA B71 2296. Producent określa

go, jako wielosezonowy, spełniający najnowsze wymogi (w pracy oznaczony, jako „5W40”).



Rys. 4.1. Elementy badanych par ciernych: a) próbka pierścieniowa, b) przeciwpróbka z stopu łożyskowego CuPb30, c) przeciwpróbka dla badań w styku liniowym (płytki zaworowa) [29]

Tabela 4.1. Skład chemiczny próbki 34CrNiMo6 [96]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
0,32-0,4%	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

Próbki pierścieniowe stosowane w badaniach tribologicznych w styku kłosek - rolka, wykonano ze stali o oznaczeniu 34CrNiMo6 (tab. 4.1) o wymiarach: średnica próbki $\phi 35$ i szerokość próbki 9mm (rys. 4.1). Próbki pierścieniowe ze stali 34CrNiMo6 wykonano w dwóch wariantach: obejmujących wyłącznie obróbkę cieplną w postaci ulepszenia cieplnego (twardość 40 HRC) oraz obejmujących ulepszenie cieplne i proces PVD, w wyniku którego wytworzono powłokę węglową typu a-C:H:W o grubości około 4 μm (tab. 4.2).

Do przeprowadzenia badań w styku liniowym, skojarzono próbki pierścieniowe ulepszone cieplnie z przeciwpróbkami w postaci komercyjnych płytek regulacji luzu zaworowego, o wymiarach $\phi 13,42 \times 2,95$ mm (tab. 4.3- 4.4). W badaniach tribologicznych zastosowano komercyjne płytki utwardzane powierzchniowo oraz identyczne płytki z dodatkowo naniesioną metodą PVD powłoką a-C:H:W o grubości około 4 μm .

Tabela 4.2. Parametry powłoki węglowej a-C:H:W

Charakterystyka	Wartość
Technologia	PVD
Grubość powłoki [μm]	1-4
Kolor	Antracyt
Powlekanie [$^{\circ}\text{C}$]	Temperatura poniżej 250
Współczynnik tarcia	0,1-0,2
Dopuszczalna maksymalna temperatura pracy powłoki [$^{\circ}\text{C}$]	300
Twardość powłoki H_{IT} [MPa]	8000 - 15000

Tabela 4.3. Wybrane właściwości stopu łożyskowego CuPb30 [28]

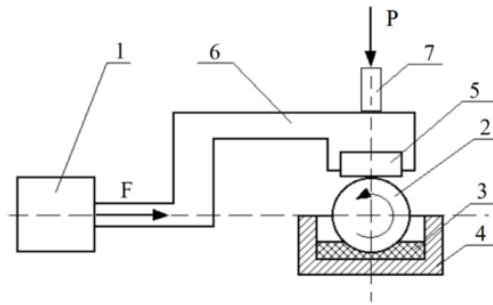
Charakterystyka	Wartość
Twardość (w skali HB)	30-45
Zawartość ołowiu (% wagowo)	26-33
Naciski jednostkowe [N/mm^2]	100-200
Temperatura maksymalna [$^{\circ}\text{C}$]	150-280
Obciążenie maksymalne [N/mm^2]	140-250
Zawartość miedzi	reszta

Tabela 4.4. Skład chemiczny przeciwpróbek użytych dla styku liniowego

C	Mn	Si	Al	Mo	Cr	Co	Cu	Fe
1,005-1,01%	0,54-0,56%	0,19-0,2%	0,02%	0,003%	0,21%	0,04%	0,034%	reszta



Rys. 4.2. Tester tribologiczny T-05



Rysunek 4.3. Schemat pary kinematycznej: 1) czujnik siły, 2) próbka pierścieniowa, 3) olej, 4) zbiornik oleju, 5) przeciwpółka, 6) ramię przenoszące siłę, 7) czujnik przemieszczenia, F) siła tarcia, P) obciążenie węzła tarcia [61]

Badania tribologiczne w styku liniowym oraz rozłożonym przeprowadzono na testerze tribologicznym T-05 typu rolka-klocek (rys. 4.2, rys. 4.3). Stanowisko było wyposażone w następujące elementy konstrukcyjne:

- zbiornik oleju,
- czujnik siły monitorujący siłę tarcia,
- uchwyty do zamocowania pary ciernej,
- termopara umożliwiająca odczyt temperatury w obszarze tarcia,
- czujnik przemieszczenia pozwalający odczytać zużycie liniowe przeciwpółki,
- odważniki służące do zadania wymaganej wartości obciążenia węzłów tarcia,
- wzmacniacz pomiarowy Spider 8,
- oprzyrządowanie podtrzymujące zasilanie w awaryjnych sytuacjach braku prądu,
- komputer z oprogramowaniem testerów.

Szczegółowe dane techniczne urządzenia oraz charakterystykę jego pracy, określono na podstawie danych producenta [46]:

- rodzaj ruchu typu ślizgowego jednokierunkowego bądź oscylacyjnego,
- geometria styku liniowa lub rozłożona,
- prędkość poślizgu do 5,5 m/s,
- kąt oscylacji do 90°,
- obciążenie do 3150 N,
- nominalna szerokość klocka wynosząca 6,35 mm,
- nominalna średnica zewnętrzna rolki równa 35 mm,
- temperatura maksymalna podgrzania oleju do 150°C,
- częstotliwość oscylacji do 8 Hz.

Urządzenie realizuje pomiar siły tarcia poprzez przetwornik tensometryczny HBM (model S2), który posiada znamionową siłę 500 N oraz czułość pomiarową równą 2 mV/V. Przemieszczenie było zarejestrowane za pomocą czujnika indukcyjnego, gdzie zakres pomiarowy wynosił 2mm, natomiast pomiar temperatury był wykonany za pomocą termopary Czaki (TP-202) wyposażoną w termoelement typu K (NiCr-NiAl).



Rysunek 4.4. Stanowisko badawcze aparat czterokulowy T-02U

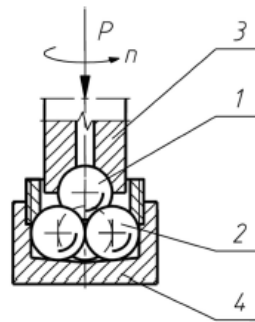
Do badań właściwości przeciwzatarciowych badanych olejów silnikowych, zastosowano tester tribologiczny T-02U (aparat czterokulowy) (rys. 4.4). Producent testera podaje poniższe dane techniczne oraz charakterystykę jego pracy [117]:

- ślizgowy lub toczny rodzaj ruchu,
- geometria styku, (punktowa lub skoncentrowana),
- obciążenie styku zmienne od 0 do maksymalnie 7848 N (z możliwością narastania w ciągły sposób),
- węzeł tarcia czterokulowy lub stożek-kule,
- sposób smarowania poprzez zanurzenie lub jednorazowe nakładanie próbki badanego środka smarnego.

W skład skojarzenia ciernego aparatu T-02U wchodzi: trzy kulki łożyskowe, które są zamocowane nieruchomo w uchwycie przyrządu i czwarta kulka, zamocowana we wrzecionie wykonująca ruch obrotowy (rys. 4.5). Kulki łożyskowe zastosowane w badaniach są wykonane ze stali łożyskowej 100Cr6, o twardości nominalnej 60-65 HRC, chropowatości powierzchni R_a równej $0,032 \mu\text{m}$ oraz średnice nominalne $1/2''$ (tab. 4.5). W badaniu właściwości przeciwzatarciowych wykorzystano wcześniej wymienione oleje silnikowe 5W30 i 5W40 przed i po próbach zużycia w testerze typu rolka kłosek – T-05.

Tabela 4.5. Skład chemiczny stali 100Cr6

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 0,03%	max 0,03%	reszta



Rysunek 4.5. Schemat skojarzenia ciernego aparatu czterokulowego: 1) kulka górna, 2) kulki dolne, 3) uchwyt kulki górnej, 4) gniazdo kulek wypełnione badanym olejem, P) obciążenie wężła tarcia, n) prędkość obrotowa silnika [117]

Ślady zużycia na kulkach po badaniach w aparacie czterokulowym (rys. 4.6) mierzono za pomocą lupy Dioptra Turnov, posiadającą podziałkę równą 0,1 mm oraz 10-krotne powiększenie.



Rysunek 4.6. Zużyta kulka po badaniu w aparacie czterokulowym.



Rysunek 4.7. Mikroskop Delta Discovery 30

Zdjęcia śladów wytarcia wykonano za pomocą mikroskopu optycznego marki Delta Discovery 30 (rys. 4.7).

Do wyznaczenia masy przeciwpróbek wykonanych ze stopu łożyskowego CuPb30 wykorzystano wagę analityczną Radwag WAA 40/160/X/1 o dokładności pomiarowej 0,01 mg. Przed wykonaniem pomiarów przeciwpróbek zostały odtłuszczone, wysuszone, a następnie zostały zważone.



Rysunek 4.8. Mikroskop Meiji Techno MI7000

Pomiary śladu zużycia płytek zaworowych podczas pracy w parach ciernych w styku liniowym na testerze T-05 typu rolka-kłosek przeprowadzono mikroskopem Meiji Techno MI7000 (rys. 4.8), posiadającym obiektyw o powiększeniu 10x w połączeniu z kamerą PCS Instruments Lu1376C-PCI oraz dedykowanym oprogramowaniem dostarczonym przez producenta.



Rysunek 4.9. Profilometr Taylor Hobson Suftronic 3+

Wyniki badań uzupełniono pomiarami parametrów chropowatości powierzchni elementów par ciernych przed i po badaniach zużycia z użyciem profilometru typu Taylor Hobson Suftronic 3+ (rys. 4.9).

Kolejno wykonano analizę stereometrii i parametrów chropowatości powierzchni uzyskanych metodą profilometrii 3D mikroskopem cyfrowym Keyence VHX-7000 (rys. 4.10) [41].



Rysunek 4.10. Mikroskop Keyence VHX-7000 [41]

4.2. Metodyka badawcza

W rozprawie doktorskiej przyjęto następujący schemat metodyki badawczej:

- 1) Przeprowadzenie badań tribologicznych par ciernych ze stykiem rozłożonym z użyciem testera T-05 typu rolka - klocek. Badania obejmowały rozruch pary cierniej w zakresie prędkości ślizgania wynoszącym od 0 do 1 m/s przy naciskach jednostkowych 5, 10, 15 i 20 MPa oraz próby zużycia pary cierniej przy naciskach jednostkowych 10, 15 i 20 MPa, prędkość obrotowej próbki pierścieniowej 100 obr/min i czasie próby 1000 s.
- 2) Przeprowadzenie badań tribologicznych par ciernych ze stykiem liniowym z użyciem testera T-05 typu rolka - klocek. Badania obejmowały rozruch pary cierniej w zakresie prędkości ślizgania od 0 do 1 m/s i sile nacisku 1200, 1800, 2400 i 3000 N oraz próby zużycia pary cierniej przy siłach nacisku wynoszących 1200, 1800, 2400 oraz 3000 N i czasie współpracy 1800 s.
- 3) Przeprowadzenie badań właściwości przeciwzatarciowych olejów silnikowych przed oraz po badaniach zużyciowych w parach ciernych w styku rozłożonym oraz styku liniowym w temperaturach 40 i 100 °C.
- 4) Przeprowadzenie badań mikroskopowych,
- 5) Ocena stopnia zanieczyszczenia olejów w komercyjnym teście „jednokropowym”.
- 6) Pomiary chropowatości powierzchni.

Badania tribologiczne w skojarzeniu ciernym w styku liniowym oraz rozłożonym wykonano z wykorzystaniem dynamicznego randomizowanego programu badawczego, co pozwoliło na zwiększenie efektywności tych badań, poprzez zastosowanie

początkowej informacji o analizowanym obiekcie oraz wynikach z opracowanych wstępnych analiz. Otrzymane w badaniach wyniki umożliwiają określenie wpływu danej badanej wielkości początkowej (wejściowej) na wielkość końcową (wyjściową). W rezultacie, program charakteryzuje dużą efektywność badań, będąc jednocześnie kompromisem pomiędzy możliwościami badań złożonych układów o sporej liczbie czynników zakłócających a wymaganiami teorii doświadczeń. Dla uzyskanych wartości pomiarowych w kolejnych etapach badań przeprowadzono analizę statystyczną, która umożliwiła ocenę, już w początkowej fazie eksperymentu, czy otrzymane wyniki pozwolą na sformułowanie wiarygodnych wniosków. Przeprowadzone wnioskowanie statystyczne stanowiło podstawę do podjęcia decyzji dotyczących zakończenia cyklu badawczego, jego modyfikacji lub kontynuacji [98, 115]. Końcowy etap opracowania wyników badań obejmował obliczenia statystyczne umożliwiające wyznaczenie przedziałów ufności, określenie rzeczywistej wartości średniej mierzonej wielkości oraz analizę zależności pomiędzy badanymi wartościami wejściowymi i wyjściowymi analizowanych parametrów procesów tarcia w badanych węzłach tarcia [68].

4.3. Badania węzłów tarcia w styku konforemnym

W badaniach stanowiskowych na testerze tribologicznym T-05 (rolka – klocek) zrealizowano następujące etapy:

- 1) Docieranie próbek:
 - a) zamocowanie danej pary ciernej, napełnienie zbiornika wybranym olejem,
 - b) rozruch oraz obciążenie węzła ciernego, start i pomiar czasu,
 - c) zatrzymanie pracy węzła tarcia oraz demontaż elementów pary ciernej,
 - d) usunięcie oleju ze zbiornika oraz jego wyczyszczenie.
- 2) Próba badawcza:
 - a) zamocowanie danej pary ciernej, napełnienie zbiornika wybranym olejem,
 - b) obciążenie węzła tarcia, zamontowanie czujników i ich kalibracja,
 - c) start biegu badawczego (pomiar w określonym zadanym czasie),
 - d) koniec próby, usunięcie oleju silnikowego ze zbiornika oraz wyczyszczenie zbiornika, demontaż pary ciernej.

W tych badaniach wykorzystano parę cierną składającą się z próbki pierścieniowej (bez i z powłoką) oraz przeciwpróbki wykonanej ze stopu łożyskowego CuPb30, przy smarowaniu obszaru tarcia olejami silnikowymi: 5W30 (nowy i po eksploatacji w silniku spalinowym) oraz 5W40 (nowy). Badania tribologiczne w styku

konforemnym odwzorowują węzeł tarcia typu wał korbowy–półpanewka silnika spalinowego. Przed rozruchem oraz badaniem zużycia, para cierna po złożeniu była docierana przy następujących parametrach: nacisk jednostkowy 10 MPa, prędkość obrotowa 500 obr/min próbki pierścieniowej i czas 240 s z wykorzystaniem badanego oleju.

Próby rozruchowe pary ciernej wykonano w celu wyznaczenia maksymalnego momentu tarcia (tzw. momentu rozruchowego) w fazie początkowej (startu) pary ciernej przy zmiennych naciskach jednostkowych. Badania rozruchowe wykonano w temperaturze około 21°C. Objętość oleju w zbiorniku wynosiła 90 ml, współczynnik kompresji danych wynosił 1, a częstotliwość próbkowania 500 Hz. W trakcie badań rejestrowano w czasie rzeczywistym siłę tarcia oraz czas trwania próby, co pozwoliło na wyznaczenie maksymalnej wartości momentu tarcia oraz wykreślenie przebiegu współczynnika tarcia w funkcji prędkości ślizgania. Ten etap badań odwzorowywał rzeczywiste warunki pracy w trakcie początkowej fazy rozruchu nierozgrzanego silnika spalinowego.

Badania prób zużycia umożliwiły wyznaczyć wpływ kompozycji pary ciernej i zmiennych nacisków jednostkowych na końcowe zużycie elementów składowych pary ciernej (próbki pierścieniowej i przeciwpróbki z stopu łożyskowego). Przeciwpróbki odłuszczone oraz zważono rejestrując początkową masę. W czasie badań zużycia rejestrowano siłę tarcia, temperaturę w obszarze tarcia i sumaryczne zużycie liniowe elementów pary ciernej oraz obliczono zużycie masowego przeciwpróbki ze stopu łożyskowego. Współczynnik kompresji danych wynosił 25, częstotliwość próbkowania 10 Hz, objętość oleju w zbiorniku wynosiła 90 ml, natomiast temperatura startowa badań około 25°C. Na podstawie uzyskanych wyników dokonano analizy procesów tribologicznych, stosując parametry pomocnicze określone w kolejnych punktach:

- ubytek masy Δm – różnica wagi przeciwpróbki z stopu łożyskowego przed próbą i po próbie zużycia,
- temperatura w obszarze styku przy końcu badania, wskazująca na średnią wartość temperatury z ostatnich 10 danych pomiarowych,
- moment tarcia przy końcu badania wskazujący średnią wartość momentu tarcia z ostatnich 30 punktów pomiarowych,
- zużycie liniowe przeciwpróbki, jako różnica pomiędzy wskazaniem czujnika przemieszczenia na początku i końcu próby.

Wyniki końcowe pomiaru mierzonych wielkości są wartością średnią z trzech powtórzonych prób dla każdego zadanego nacisku jednostkowego.

Po przeprowadzonych badaniach wykonano zdjęcia, zmierzono parametry chropowatości powierzchni roboczych próbek pierścieniowych i przeciwpróbek ze stopu łożyskowego CuPb30. Pomiar parametry chropowatości powierzchni: Ra, Rz, RSm, Rq wykonano w oparciu o normę ISO 4287. Wartości parametrów chropowatości powierzchni wyznaczono w oparciu o pomiar 5 odcinków pomiarach, na długość 4 mm na próbce pierścieniowej i na długości 2,5mm na wycinku przeciwpróbki ze stopu łożyskowego.

4.4. Badania węzłów tarcia ze stykiem niekonforemnym

Badania węzłów tarcia ze stykiem niekonforemnym zostały przeprowadzone w parze ciernej rolka-klocek. W skład pary ciernej wchodziła próbka pierścieniowa i przeciwpróbka, którą w tych badaniach była płytką zaworowa regulatora luzu zaworowego. Warstwa powierzchniowa próbek pierścieniowych stalowych była ulepszana cieplnie, natomiast regulatory luzu zaworowego był w wersji komercyjnej (utwardzony powierzchniowo) i powłoką a-C:H:W. Obszar tarcia w parze ciernej smarowano olejem 5W30 nowym i zużytym oraz 5W40.

Przed właściwym badaniem, próbki zostały dotarte: nacisk jednostkowy 1500 N, prędkość obrotowa próbki pierścieniowej 100 obr/min, czas docierania 30 s i smarowanie badanym olejem. Badania w styku niekonforemnym, to model tribologiczny węzła tarcia krzywka wałka rozrządu – popychacz w układzie rozrządu silnika spalinowego. Rozruch pary ciernej został przeprowadzony w celu określenia maksymalnego momentu rozruchowego w początkowej fazie rozpędzenia pary ciernej ze stykiem niekonforemnym. Objętość oleju w naczyniu testera podczas prób wynosiła 90 ml, współczynnik kompresji danych na poziomie 2 i częstotliwość próbkowania 100 Hz. Podczas badań aparatura mierzyła siłę tarcia w funkcji czasu trwania próby i na jej podstawie obliczono wartości momentu tarcia.

Podczas prób zużycia wyznaczono zużycie pary ciernej i rejestrowano parametry tarcia podczas długotrwałej pracy węzłów tarcia przy ustalonej prędkości obrotowej próbki pierścieniowej 100 obr/min. Badania zużycia przy zadanych siłach nacisku odbywały się na tej samej próbce badanego oleju oraz z zastosowaniem jednego pierścienia, co pozwoliło na degradację zastosowanego oleju. Dla każdego cyklu próby wykonano trzy powtórzenia, następnie wynikiem badania była wartość średnia

arytmetycznej z tych biegów. W badaniach przy 1200 N wyniki były zbyt rozbieżne, dlatego nie uwzględniono ich w przedstawieniu wyników, ponieważ nie pozwalały one oszacować mierzalnego zużycia. Objętość oleju w naczyniu aparatu tribologicznego wynosiła 90 ml, temperatura początkowa około 25°C, współczynnik kompresji danych 25 i częstotliwość próbkowania 10 Hz. Podczas prób rejestrowano siłę tarcia jak i temperaturę w obszarze styku par ciernych. W badaniach zużycia w styku liniowym, oszacowano parametry współpracy, takie jak:

- średnia wartość temperatury w obszarze tarcia z 30 ostatnich danych pomiarowych,
- średnia wartość siły tarcia z ostatnich 30 danych pomiarowych.

Po zakończeniu badań zużycia, przeprowadzono pomiar szerokości śladu wytarcia na płytkach zaworowych (za pomocą mikroskopu), ślad zużycia został zmierzony w trzech przekrojach. Pierwszy wynik był mierzony w środku długości śladu wytarcia, drugi i trzeci wynik mierzono symetrycznie względem pierwszego, w odległości 1 mm. Po przeprowadzeniu pomiarów, próbki pierścieniowe oraz współpracujące z nimi powierzchnie płytek zaworowych poddano badaniom chropowatości powierzchni. Podobnie jak w przypadku badań w styku konforemnym, zmierzono parametry chropowatości powierzchni roboczych próbek pierścieniowych i płytek zaworowych po badaniach w styku niekonforemnym, mierząc parametry: Ra, Rz, RSm, Rq. Pomiary wykonano w oparciu o normę ISO 4287, natomiast odcinek pomiarowy podczas pomiaru próbek miał długość 4mm. Pomiary były przeprowadzone w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku ruchu pierścienia. Wykonano również pomiar stereometrii powierzchni wraz z pomiarem chropowatości powierzchni z zastosowaniem profilometrii 3D, badając parametry chropowatości powierzchni Sa, Sz, Sq, Ssk, Sku, Sp oraz Sv.

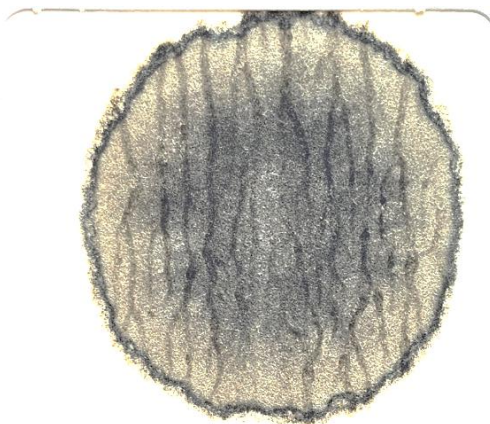
4.5. Badania olejów silnikowych po przeprowadzonych badaniach

4.5.1. Test jednokropłowy

Badania stanu olejów silnikowych zostały przeprowadzone w teście „jednokropłowym”, pozwalającym na wizualną ocenę struktury plamy oleju silnikowego po jego próbach zużycia w testerze T-05 i po próbach zatarcia w aparacie czterokulowym T-02. Test polegał na użyciu jednej kropli oleju silnikowego, którą umieszczano

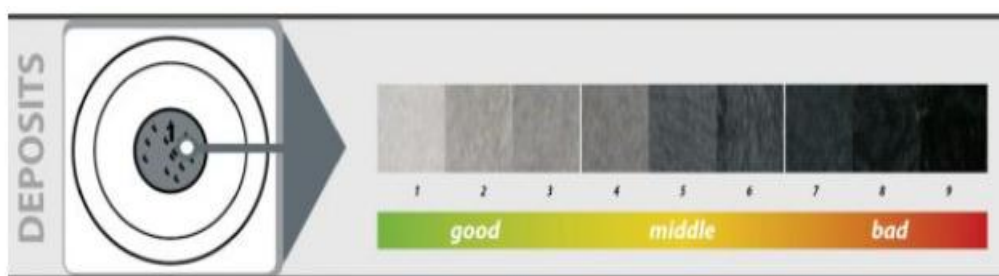
w oznaczonym miejscu w polu testu (rys. 4.11). Kolejność badania wyglądała następująco:

- 1) demontaż okładki zabezpieczającej pole badane,
- 2) pobranie próbki oleju silnikowego (w temperaturze roboczej ok 85 - 90°C),
- 3) podanie kropli oleju silnikowego na wyznaczone pole badawcze,
- 4) zapisanie czasu podania kropli oraz obserwacja jej zachowania przez kolejno 1, 6, 10 oraz 24 godziny.



Rysunek 4.11. Próbka oleju silnikowego na teście po 24 godzinach od podania kropli

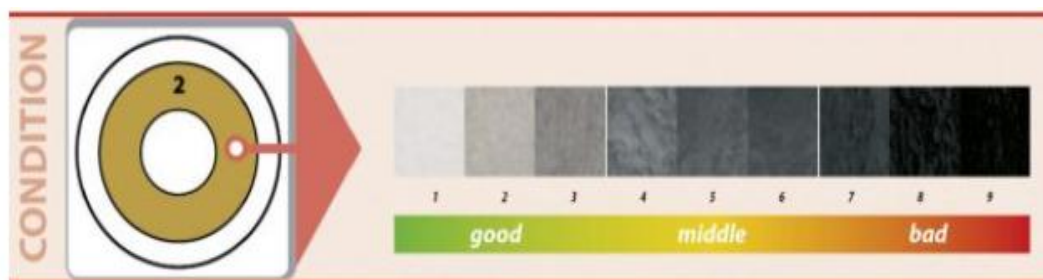
Przedstawione wyniki graficzne zostały wykonane po 24 godzinach od naniesienia kropli oleju silnikowego. Test obejmuje 4 strefy, gdzie pierwsza to okrąg środkowy, który informuje o zanieczyszczenia oleju silnikowego małymi cząsteczkami (brud, kurz, otarcia, cząsteczki spalin itd.) (rys. 4.12). Obecność mniejszej liczby zanieczyszczeń w pierwszym wewnętrznym okręgu świadczy o wyższej czystości badanego oleju silnikowego. Stan czystości oleju silnikowego w tym teście w dużym stopniu zależy od stanu eksploatacji silnika oraz przebiegu, podczas którego olej silnikowy pracował. Wraz ze wzrostem przebiegu może następować zwiększenie liczby cząsteczek zanieczyszczeń.



Rysunek 4.12. Pierwszy okrąg wewnętrzny testu – cząsteczki w oleju silnikowym [34]

Producent określa stopnie poszczególnych okręgów testu: jaśniejsze kolory, zbliżone do odcieni szarości i bieli, wskazują lepszą kondycję oleju silnikowego, natomiast ciemniejsze kolory – pogorszenie właściwości badanego oleju silnikowego.

Drugi okrąg testu wskazujący na ogólną stan użytkowy badanego oleju. Podobnie jak w przypadku pierwszego okręgu, im ten obszar jest jaśniejszy, to odpowiada to wyższej jakości badanego oleju silnikowego pod względem czystości (rys. 4.13).

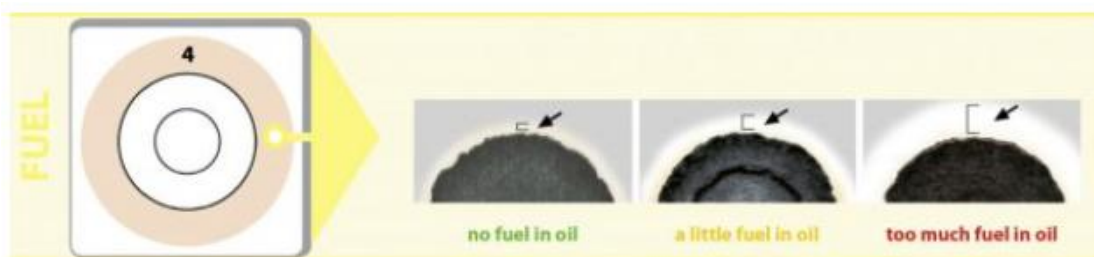


Rysunek 4.13. Drugi okrąg testu – kondycja ogólna oleju [34]

Trzeci okrąg testu pokazuje zawartość wody w próbce olejowej (rys. 4.14). Charakterystyka tego obszaru jest zazwyczaj poszarpana. Im bardziej poszarpana, nierówna, tym większa ilość wody w oleju silnikowym. W silnikach spalinowych może to być zależne od skondensowanej wody w oleju oraz pobieranego przez nieszczelności z płynu chłodniczego. Jeżeli próbka wokół poszarpanego okręgu posiada żółtawe zapełnienie, wskazuje to na obecność płynu chłodniczego w oleju silnikowym.



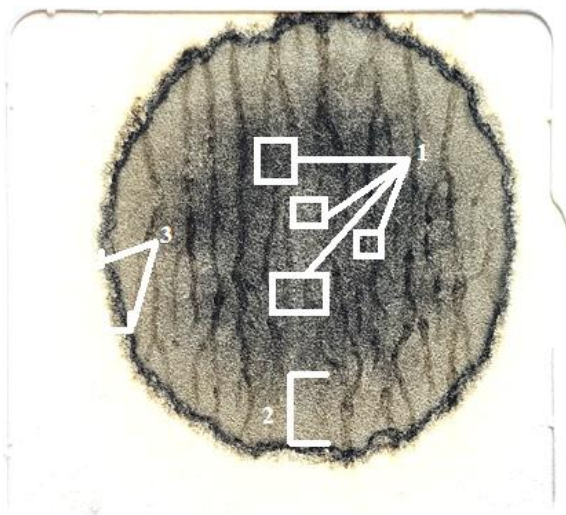
Rysunek 4.14. Trzeci poszarpany okrąg testu – zawartość wody lub płynu chłodniczego w próbce olejowej [34]



Rysunek 4.15. Czwarty okrąg testu – zawartość paliwa w próbce olejowej [34]

Czwarty okrąg (rys. 4.15) testu olejowego wskazuje na zawartość paliwa w oleju silnikowym. Bardzo jasny obszar wskazuje na wysoką zawartość paliwa w oleju, jeśli jest mało zauważalny, świadczy to o bardzo niskiej bądź żadnej obecności paliwa.

Poniżej przedstawiono poszczególne strefy oraz ich wskazania na rzeczywistym oknie testu jednokropłowego (rys. 4.16), znacznik 1 pokazuje zawartości mikrocząsteczek w oleju silnikowym, znacznik 2 o kondycji czystości oleju, znacznik 3 o zawartości wody lub płynu chłodniczego oraz znacznik 4 o zawartości paliwa.



Rysunek 4.16. Poszczególne właściwości testu zaznaczone na próbce olejowej: 1) pierwszy okrąg, 2) drugi okrąg, 3) trzeci okrąg

4.5.2. Właściwości przeciwzatarciowe olejów silnikowych

Prócz analizy wyników testów jednokropłowych badanych olejów silnikowych, przeprowadzono pomiary w aparacie czterokulowym pod względem zmian właściwości przeciwzatarciowych badanych olejów silnikowych w efekcie procesów tribologicznych w badaniach par ciernych. Aby móc porównać oleje, przeprowadzono badania przed i po badaniach w styku liniowym i rozłożonym, z próbkami stalowymi oraz próbkami z powłoką a-C:H:W. Podczas badań rejestrowano przebieg momentu tarcia w funkcji obciążenia węzła tarcia. Wynik umożliwił wyznaczenie obciążenia zacierającego P_t (według normy PN-76/C-04147) oraz obliczenie wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} według metody ITeE-PIB (wzór 1):

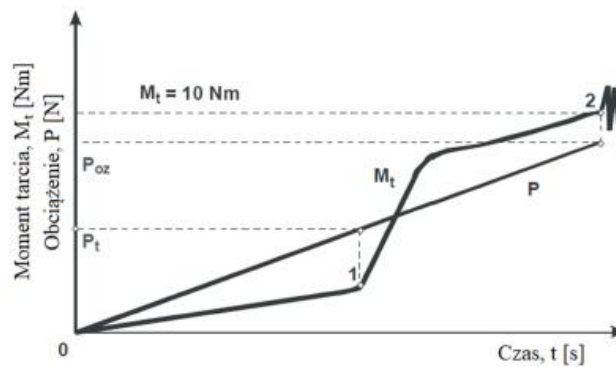
$$p_{oz} = 0,52 \frac{P_{oz}}{d^2} \quad (1)$$

gdzie:

P_{oz} – obciążenie zatarcia,

d – średnica śladu zużycia.

W badaniach zastosowano następujące parametry: obciążenie wężła tarcia rosło liniowo od 0 do 7200 N (metoda dynamiczna) w dwóch temperaturach, 40 oraz 100°C. Czas trwania próby wynosił 18 s, zadano prędkość narastania obciążenia 409 N/s. Objętość oleju silnikowego w naczyniu aparatu czterokulowego wynosiła 30 ml, częstotliwość próbkowania danych 75 Hz natomiast współczynnik kompresji to wartość 1. Badania rejestrowały moment tarcia i temperaturę pary ciekiej oraz obciążenie wężła tarcia. Próby badawcze były powtarzane dla danego cyklu 3 krotnie, a za właściwy wynik uznawano średnią arytmetyczną danych prób, gdzie wyniki nie różniły się więcej niż 10% [117].



Rysunek 4.17. Modelowy przebieg momentu tarcia i obciążenia w funkcji czasu próby na aparacie czterokulowym: 1 – punkt inicjacji zacierania, 2 – punkt zatarcia wężła tarcia, P – obciążenie wężła tarcia, P_t – obciążenie zacierające, P_{oz} – obciążenie zatarcia, M_t – moment tarcia [117]

Odczyt średnicy śladu zużycia d odbywał się za pomocą lupy o podziałce 0,1 mm – mierzono dwie prostopadłe do siebie płaszczyzny. Obciążenie zacierające P_t i obciążenie zatarcia P_{oz} wyznaczono w oparciu o schemat modelowego przebiegu momentu tarcia i obciążenia w funkcji czasu próby na aparacie czterokulowym (rys. 4.17). W przypadku nie osiągnięcia wartości momentu tarcia $M_t = 10\text{Nm}$ zastosowano metodę wyznaczenia paramentów zacierania pary ciekiej zgodnie z literaturą, przyjmując wartość maksymalną do obliczenia granicznego nacisku zatarcia [83].

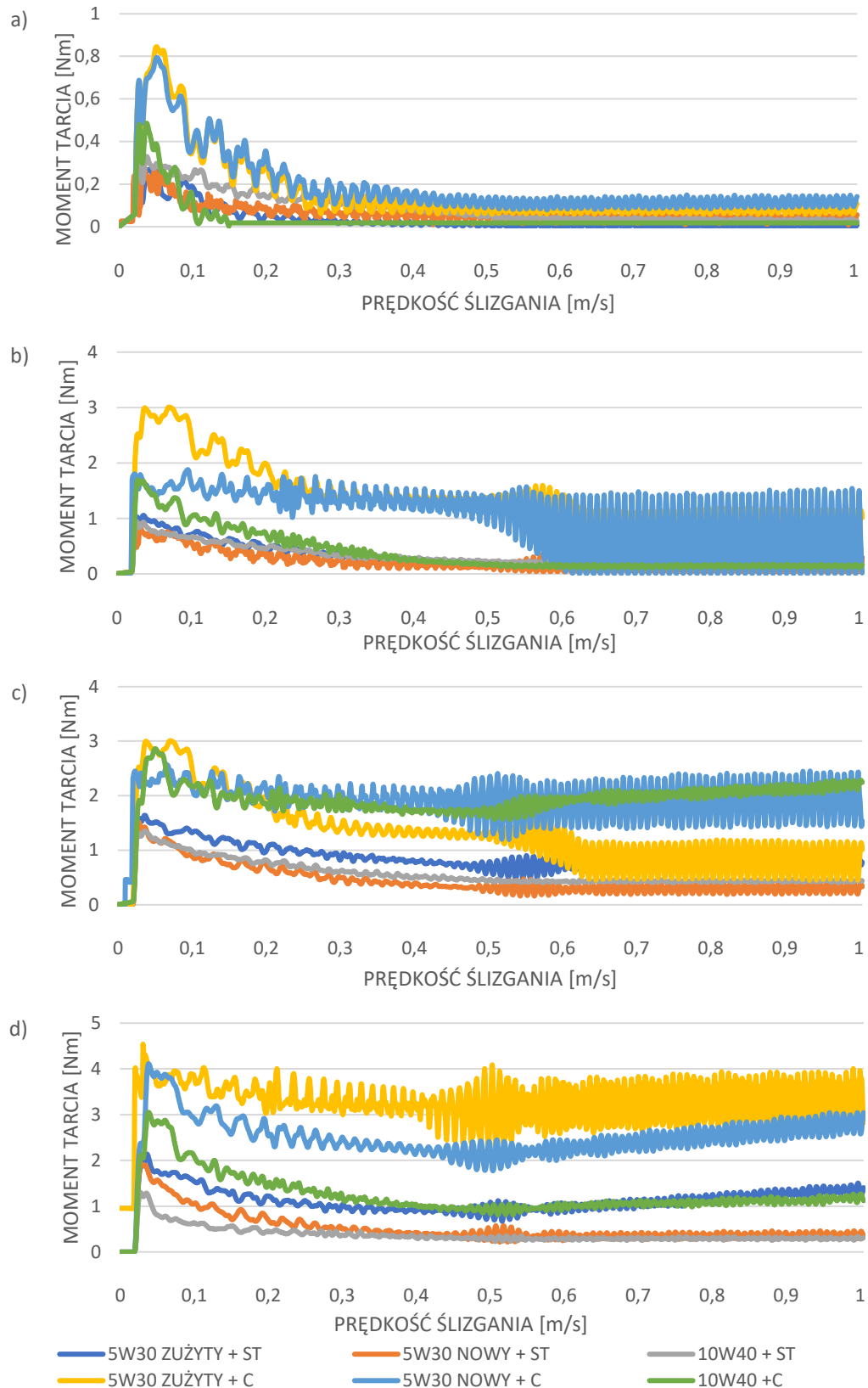
5. WYNIKI BADAŃ

5.1. Procesy tribologiczne w parach ciernych ze stykiem konforemnym

5.1.1. Warunki tarcia w parach ciernych

Podczas rozruchu pary cierniej zachodzą intensywne zjawiska tarciove wynikające z adaptacji warstwy powierzchniowej elementów pary do zmieniających się warunków obciążenia, które w głównej mierze są konsekwencją wzrostu prędkości ślizgania. W tej fazie pracy pary jednym z kluczowych parametrów eksploatacyjnych pozostaje maksymalny moment tarcia. W trakcie badań procesu rozruchu rejestrowano przebiegi siły tarcia w funkcji prędkości ślizgowej, co umożliwiło wyznaczenie współczynnika tarcia oraz maksymalnej wartości momentu tarcia, określanego jako moment rozruchowy, dla badanych par ciernych. Badania przebiegów współczynnika tarcia wykazały znaczny wzrost oporów tarcia podczas rozruchu pary cierniej aż do osiągnięcia w próbie maksymalnych wartości, by następnie zanotować spadek wartości współczynnika tarcia, a następnie jego stopniowy wzrost lub stabilizację.

Najwyższy moment tarcia przy każdym nacisku jednostkowym zmierzono w parze cierniej smarowanej olejem silnikowym 5W30 użytym i z próbką pierścieniową z powłoką węglową a-C:H:W, gdzie jego wartość wyniosła 0,84 Nm dla 5 MPa, 3 Nm dla 10 i 15 MPa oraz 4,54 Nm dla 20 MPa (tab. 5.1). Natomiast najniższe wartości momentu tarcia zaobserwowano w skojarzeniu ciernym smarowanym olejem 5W40 i z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie, gdzie moment wyniósł 0,92 Nm przy nacisku jednostkowym 10 MPa, 1,33 Nm przy nacisku 15 MPa oraz 1,29 Nm przy nacisku 20 MPa (rys. 5.1). Wyjątkiem w tej parze cierniej była wartość momentu rozruchowego przy nacisku jednostkowym 5 MPa, gdzie wyniósł on 0,33 Nm. Mniejszą wartość momentu rozruchowego przy tym nacisku wyznaczono w skojarzeniu ciernym smarowanym olejem silnikowym 5W30 użyty i próbki pierścieniowej ulepszonej cieplnie, równą 0,27 Nm. W skojarzeniu ciernym smarowanym olejem 5W30 nowym i próbki pierścieniowej ulepszonej cieplnie moment rozruchowy wyniósł przy tym nacisku jednostkowym 0,29 Nm (rys. 5.1b). Przy nacisku jednostkowym 5 MPa wzrost prędkości ślizgania w parze cierniej powoduje istotny spadek momentu tarcia i jego stabilizację, przy czym w parach smarowanych olejem 5W30 i z próbką z powłoką a-C:H:W stabilizację obserwuje się przy prędkościach powyżej 0,5 m/s, gdzie moment tarcia wynosi około

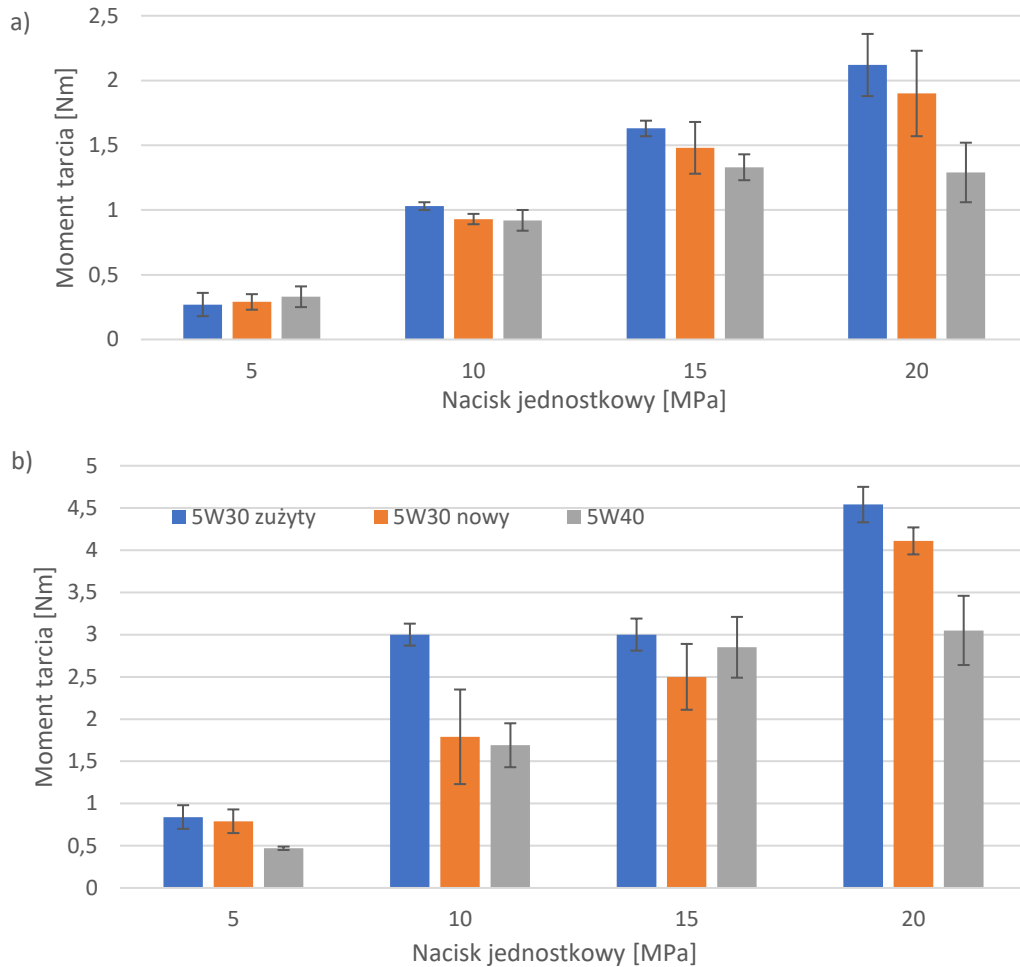


Rysunek 5.1. Moment rozruchowy w parach ciernych ze stykiem konforemnym smarowanych olejami silnikowymi 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40 w funkcji prędkości ślizgania przy naciskach jednostkowych a) 5 MPa, b) 10 MPa, c) 15 MPa, d) 20 MPa; (ST- z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie, C- z próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W)

Tabela 5.1. Moment rozruchowy par ciernych ze stykiem rozłożonym [Nm]

Skojarzenie cierne						
Nacisk jednostkowy [MPa]	Próbki pierścieniowe ulepszone cieplnie – przeciwpróbki CuPb30			Próbki pierścieniowe z powłoką węglową – przeciwpróbki CuPb30		
	Rodzaj użytego oleju					
	5W30 zużyty	5W30 nowy	5W40	5W30 zużyty	5W30 nowy	5W40
5	0,27	0,29	0,33	0,84	0,79	0,47
10	1,03	0,93	0,92	3	1,79	1,69
15	1,63	1,48	1,33	3	2,5	2,85
20	2,12	1,9	1,29	4,54	4,11	3,05

0,08 Nm. Najniższe wartości po fazie początkowej zaobserwowano w parze ciernej smarowanej olejem 5W40 z próbką z powłoką węglową, gdzie stabilizacja zachodzi po około 0,15 m/s na poziomie 0,017 Nm. Przy nacisku jednostkowym 10 MPa, oleje 5W30 zużyty i nowy z próbkami węglowymi a-C:H:W zarejestrowały spadek momentu tarcia wraz ze wzrostem prędkości ślizgania. Po początkowej fazie osiągnęły około 1,4 Nm przy prędkości ślizgania 0,3 m/s. Przy prędkości ślizgania 0,55 m/s wartości momentu tarcia w tych parach ciernych zanotowały większe skoki wartości – od niemal 0,01 Nm do 1,7 Nm (rys. 5.1b). Pozostałe pary cierne odnotowały przebieg wartości momentu tarcia, gdzie przy prędkości ślizgania 0,5 m/s ustabilizowały się w wielkości 0,15 Nm. Po początkowej fazie przy nacisku jednostkowym 15 MPa, zaobserwowano spadek wartości momentu tarcia w parach ciernych oleju silnikowego 5W40 i próbki pierścieniowej ulepszonej cieplnie, oleju silnikowego 5W30 nowego i próbki pierścieniowej ulepszonej cieplnie oraz skojarzenia ciernego oleju 5W30 zużytego i powłoki węglowej. W przypadku par ciernych stosujących olej 5W30 zużyty i próbkę pierścieniową ulepszaną cieplnie oraz pary ciernej z olejem 5W40 i próbką pierścieniową z powłoką węglową po fazie początkowej zaobserwowano spadek wartości momentu tarcia, jednak przy zwiększeniu prędkości ślizgania po około 0,5 m/s moment osiągnął tendencję wzrostową. Podczas badań przy sile nacisku 20 MPa, wraz ze wzrostem prędkości ślizgania, po fazie początkowej wartość momentu tarcia zmalała, stabilizując się po 0,5 m/s na wielkości momentu tarcia 0,27 Nm w parach ciernych z olejem silnikowym 5W30 nowym i próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie oraz olejem silnikowym 5W40 i próbką ulepszaną cieplnie. W pozostałych parach ciernych, przebieg



Rysunek 5.2. Moment rozruchowy w parach ciernych smarowanych olejami silnikowymi w funkcji nacisków jednostkowych: a) próbka pierścieniowa ulepszana cieplnie, b) próbka pierścieniowa z powłoką a-C:H:W

momentu również zmalał po fazie początkowej do około 0,5 m/s, by następnie zachować trend wzrostowy. Na koniec badania, najwyższy moment rozruchowy odnotowało w skojarzeniu ciernym smarowanym olejem 5W30 zużytego i próbki z powłoką a-C:H:W, wynosząc średnio 3,5 Nm (rys. 5.1d). Zarejestrowane podczas badania siły tarcia w początkowych fazach rozruchu par ciernych (rys. 5.1b), umożliwiły wyznaczenie wartości momentów rozruchowych w zależności od nacisku jednostkowego w obszarze styków elementów skojarzenia (tab. 5.1). Maksymalny moment rozruchowy w początkowej fazie rozruchu pary cierniej osiągał wyższe wartości w parach ciernych z zastosowaniem próbki pierścieniowej pokrytej powłoką węglową. Przy najwyższych naciskach 20 MPa w parach ciernych z użyciem oleju 5W30 zużytego moment tarcia był 114% większy w parach z próbką a-C:H:W (4,54 Nm) w porównaniu do par stosujących próbki pierścieniowe ulepszane cieplnie (2,12 Nm) (rys. 5.2). W skojarzeniach ciernych smarowanych olejem silnikowym 5W30 nowym, różnica wynosiła 116% (4,11 Nm

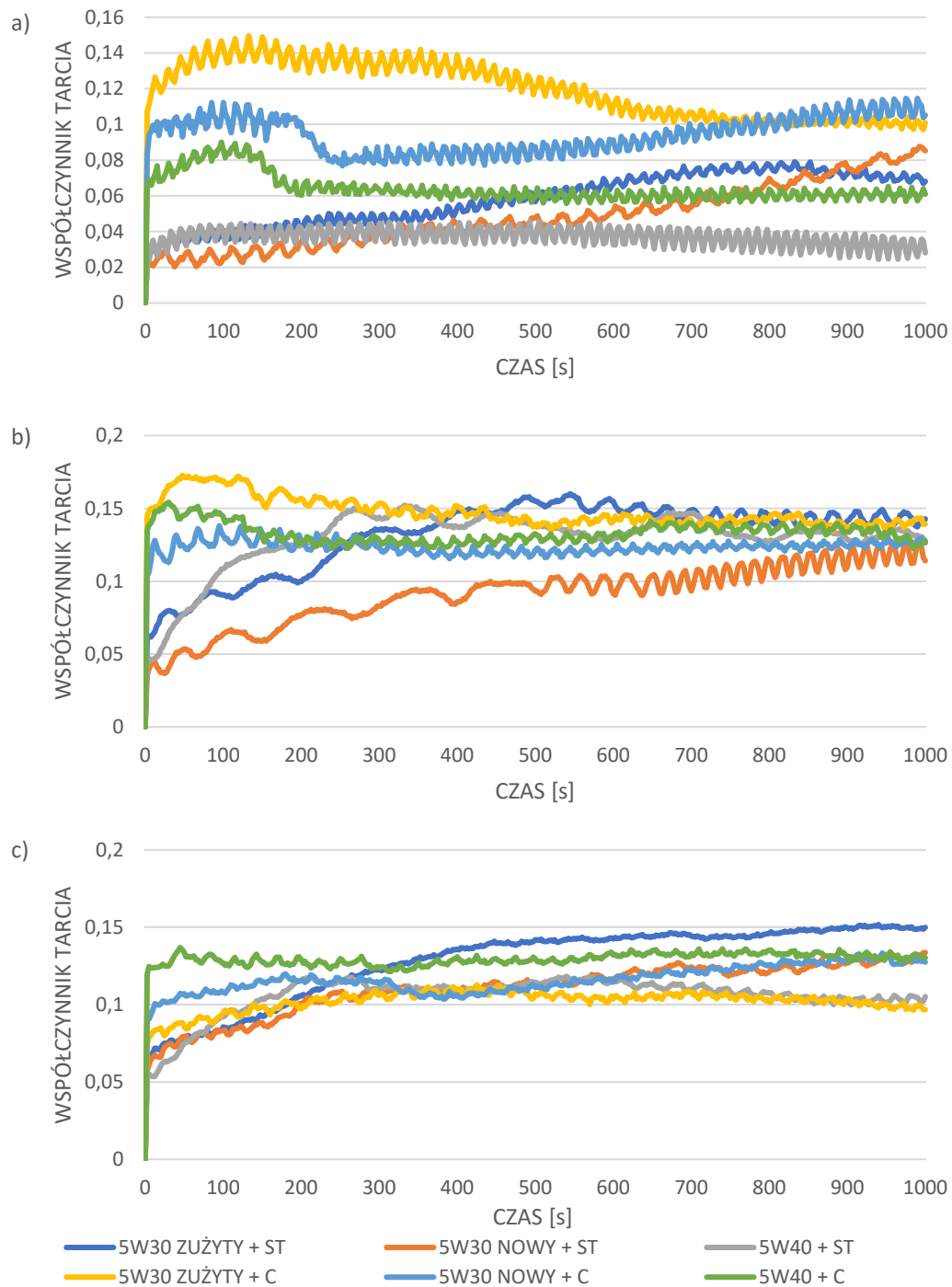
w skojarzeniu z próbką a-C:H:W i 1,9 Nm w skojarzeniu z próbką ulepszaną cieplnie). W badaniach skojarzeń ciernych z użyciem oleju 5W40 i próbkami pierścieniowymi z powłoką a-C:H:W wartość momentu tarcia była o 136% wyższa niż w parze ciernej z próbką ulepszana cieplnie (3,05 Nm oraz 1,29 Nm) (rys. 5.2).

5.1.2. Zużycie par ciernych ze stykiem konforemnym

W trakcie badań zużycia par ciernych przy stałej prędkości ślizgania w skojarzeniu konforemnym rejestrowano zmiany współczynnika tarcia, temperatury oraz łączne zużycie liniowe elementów konstrukcyjnych pary w funkcji czasu trwania próby. Ponieważ pomiary nie wykazały zauważalnego zużycia próbek pierścieniowych, zatem przyjęto, iż wielkość zmierzonego zużycia liniowego odnosi się wyłącznie do zużycia przeciwpróbek wykonanych ze stopu łożyskowego CuPb30.

Najwyższą wartość współczynnika tarcia w badaniach zużycia w skojarzeniach ciernych przy naciskach jednostkowych 10 MPa, zaobserwowano w parze ciernej smarowanej olejem silnikowym 5W30 zużytym i z próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W (rys. 5.3a). Podczas intensywnego wzrostu oporów tarcia na początku badania, współczynnik tarcia osiągnął maksymalną wartość 0,149 w ok. 150 s trwania badania, następnie jego przebieg nieznacznie zmniejszył się i wykazywał powolną tendencję malejącą do końca trwania badania. Para cierna smarowana olejem silnikowym 5W30 nowym i z próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W, po starcie badania osiągnęła współczynnik tarcia na poziomie 0,112 na początku badania. Pomiędzy 180 a 270 s trwania badania, wartość współczynnika tarcia wykazywała tendencję spadkową, osiągając wartość 0,08, by następnie do końca badania występowała tendencja wzrostowa. Najbardziej stabilny przebieg współczynnika tarcia w funkcji czasu osiągnęło skojarzenie cierne smarowane olejem silnikowym 5W40 i z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie, gdzie po wzroście do około 0,042 po starcie badania, jego wartość pozostawała w trendzie spadkowym, obniżając się do wartości około 0,03. Para cierna smarowana olejem 5W30 nowym i próbki pierścieniowej ulepszonej cieplnie zachowała tendencję wzrostową przez cały czas badania, zaczynając od wartości współczynnika 0,03, a kończąc na wartości 0,082 (rys. 5.3a).

Współczynnik tarcia w parach ciernych z próbkami pierścieniowymi z powłokami węglowymi wykazuje wyższe wartości przy starcie pary w porównaniu do par z próbkami



Rysunek 5.3. Współczynnik tarcia w parach ciernych smarowanych olejami silnikowymi 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40 w funkcji czasu przy naciskach jednostkowych: a) 10 MPa, b) 15 MPa, c) 20 MPa; (ST- z próbką pierścieniową ulepszoną cieplnie, C- z próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W)

pierścieniowymi z warstwą powierzchniową ulepszoną cieplnie. W parach smarowanych olejem 5W30 zużytym różnica oporów tarcia w początkowej fazie badań to ok. 300%, w parach smarowanych olejami 5W30 nowymi różnica wynosi 240%, natomiast w parach ciernych smarowanych olejami 5W40 ta różnica wynosi 114% (rys. 5.3a). Mimo, że pary cierne z próbkami z powłokami a-C:H:W osiągały początkowo wartości

współczynnika tarcia znacznie wyższe niż w przypadku par z próbkami pierścieniowymi ulepszanymi cieplnie, dalszy przebieg zmian współczynnika tarcia w czasie nie pozwala na sformułowanie jednoznacznych trendów zmian. Przykładowo, w parach ciernych smarowanych olejem silnikowym 5W30 zużyтым i z próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W, po około 400 s obserwuje się tendencję spadkową wartości współczynnika tarcia, podczas gdy w analogicznym skojarzeniu z olejem 5W30 nowym i tą samą próbką z powłoką, w tym samym przedziale czasu widoczna jest tendencja wzrostowa (rys. 5.3a).

W badaniach zużycia par ciernych przy naciskach 15 MPa, najwyższą wartość współczynnika tarcia tak jak w przypadku nacisku 10 MPa, osiągnęło skojarzenie cierne smarowane olejem silnikowym 5W30 zużyтым i z próbką z powłoką węglową, uzyskując wartość 0,174. W późniejszej fazie trwania badania, tej pary cierniej współczynnik tarcia wykazywał tendencję obniżającą się, aby na koniec badań uzyskać wartość 0,138. Para cierna smarowana olejem 5W30 zużyтым i z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie charakteryzuje się najwyższą wartością współczynnika tarcia 0,059, a po przekroczeniu połowy czasu badania, wartość wynosiła 0,16 (rys. 5.3b). Od tego momentu, przebieg współczynnika tarcia obniżał się, wykazując na koniec badania wartość 0,142. Przebieg współczynnika tarcia wykazywał tendencję do stabilizacji również w skojarzeniu ciernym smarowanym olejem silnikowym 5W30 nowym i z próbką pierścieniową z powłoką węglową. W początkowej fazie badania osiągnął on wartość 0,137, by na koniec badania wynieść 0,124. Najniższe wartości współczynnika tarcia w badaniu przy naciskach 15 MPa zaobserwowano w skojarzeniach ciernych smarowanych olejem 5W30 nowym i z próbką ulepszaną cieplnie, gdzie zanotowano jego wartość 0,043 na początku badania, a później wykazywał on tendencję wzrostową i na koniec badania wyniósł około 0,121 (rys. 5.3b). Zaobserwowano znacznie większe wartości współczynnika tarcia na początku badań w skojarzeniach ciernych stosujących próbki pierścieniowe z powłoką węglową w porównaniu do par ciernych z próbkami pierścieniowymi ulepszanymi cieplnie. Różnica ta w przypadku par ciernych smarowanych olejem 5W30 zużyтым, to 195%, w parach ciernych z użyciem oleju 5W30 nowego 218%, a w przypadku smarowania olejem 5W40 to 197% (rys. 5.3b).

Badania zużycia przy największym nacisku jednostkowym 20 MPa, wykazały najintensywniejsze zmiany oporu tarcia w skojarzeniu ciernym smarowanym olejem 5W30 zużyтым i z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie, gdzie na początku badania wartość współczynnika tarcia oscylowała w granicy 0,07, następnie wystąpiła tendencja

wzrostowa i na koniec próby jego wartość wynosiła 0,151 (rys. 5.3c). W początkowej fazie badania najwyższą wartość współczynnika tarcia zmierzono w parze ciernej z olejem silnikowym 5W40 i z próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W – 0,137, a następnie jego przebieg nieomal się ustabilizował, wykazując na koniec badania wartość na poziomie 0,13. Para cierna smarowana olejem 5W30 użytym i z próbką z powłoką węglową przy obciążeniach 10 i 15 MPa osiągała najwyższe wartości współczynnika tarcia, natomiast przy 20 MPa na początku badania osiągnęła około 0,08, by na koniec badania zarejestrować wartość 0,098 i była to najniższa jego wartość w badaniach par ciernych przy nacisku jednostkowym 20 MPa (rys. 5.3c).

Porównując wartości współczynnika tarcia w początkowej fazie badań dla par tarcia z próbką pierścieniową pokrytą powłoką węglową oraz próbką ulepszaną cieplnie, zaobserwowano wyższe wartości współczynnika tarcia dla skojarzeń z elementem pokrytym powłoką węglową. Wzrost ten wynosił około 14% w przypadku smarowania przearacowanym olejem silnikowym 5W30 użytym, około 47% dla nowego oleju silnikowego 5W30 oraz około 119% dla skojarzeń smarowanych olejem silnikowym 5W40. Pod koniec badań, wartość współczynnika tarcia najwyższa była w parach ciernych smarowanych olejem 5W30 i z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie (około 0,15). W parach tarcia smarowanych nowym olejem silnikowym 5W30, zarówno dla próbki pierścieniowej ulepszanej cieplnie, jak i pokrytej powłoką węglową, a także w skojarzeniu smarowanym olejem silnikowym 5W40 z próbką pierścieniową pokrytą powłoką węglową, wartości współczynnika tarcia były zbliżone i mieściły się w zakresie 0,132–0,137. Para cierna smarowana olejem 5W30 użytym i z próbką stalową ulepszaną cieplnie oraz para cierna smarowana olejem 5W40 i z próbką stalową na koniec badania również-uzyskały zbliżone do siebie wartości współczynnika, który wyniósł 0,098-0,101 (rys. 5.3c).

Przeprowadzone badania zużycia par ciernych umożliwiły również rejestracje siły tarcia, temperatury w obszarze tarcia i zużycia liniowego i wagowego stopu łożyskowego CuPb30 (tab. 5.2). Najmniejszą wartość siły tarcia zmierzono w parze ciernej smarowanej olejem 5W30 i z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie – 31,49 N, przy nacisku jednostkowym 10 MPa. Największą siłę tarcia, przy nacisku 20 MPa, wyniosła 299,98 N i zarejestrowano ją w parze ciernej smarowanej olejem silnikowym 5W30 użytym i z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie.

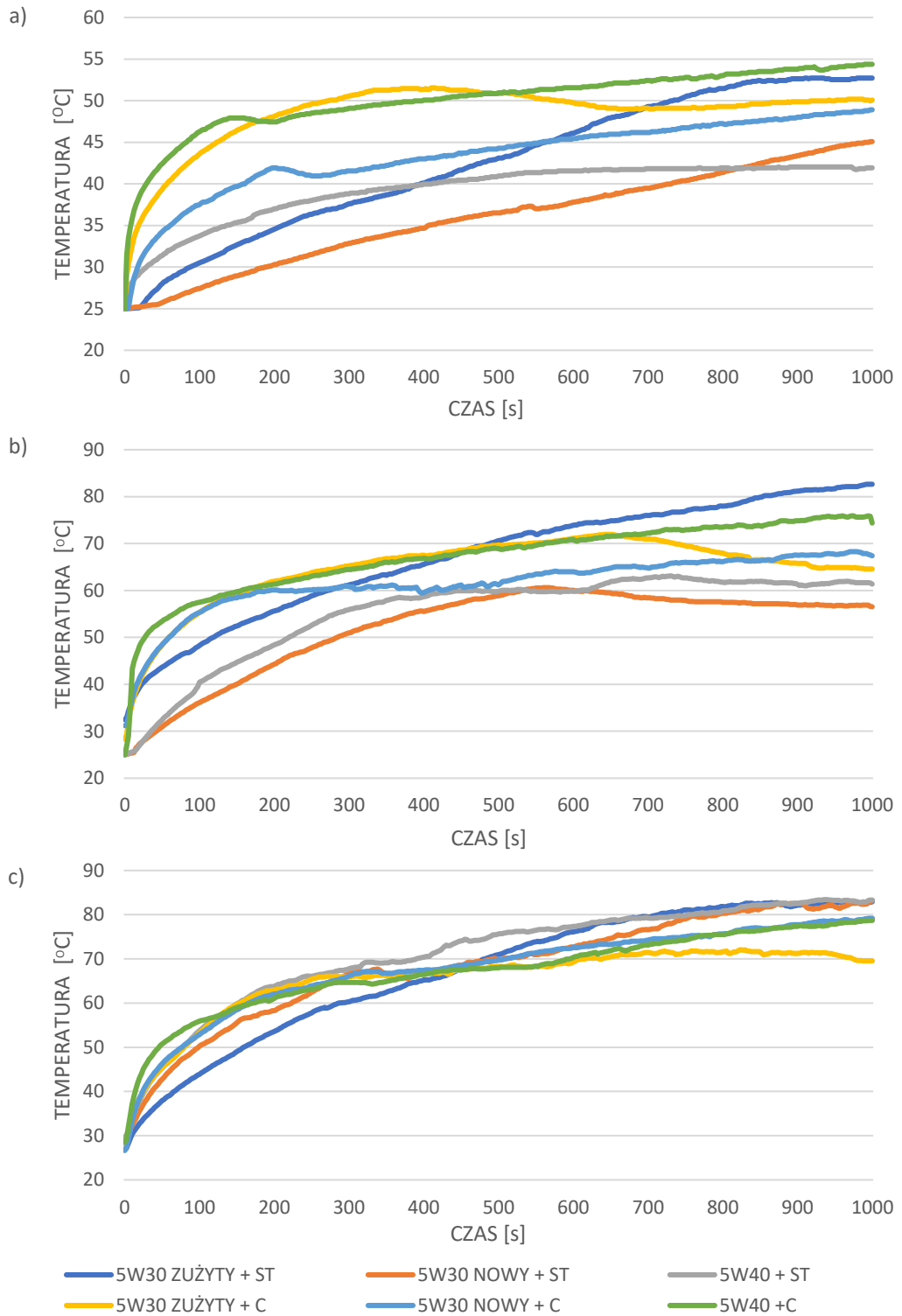
Parametrem mierzonym podczas prób zużycia była także temperatura w obszarze styku pary ciernej. Zmiany temperatury były proporcjonalnie do zadanego nacisku

Tabela 5.2. Siła tarcia, temperatura w obszarze tarcia, zużycie liniowe i zużycie wagowe przeciwpróbek z stopu łożyskowego CuPb30 w parze ciernej ze stykiem rozłożonym

Skojarzenie pary ciernej						
Nacisk jednostkowy [MPa]	Próbki pierścieniowe ulepszone cieplnie – przeciwpróbki CuPb30			Próbki pierścieniowe z powłoką węglową – przeciwpróbki CuPb30		
	Rodzaj użytego oleju					
	5W30 zużyty	5W30 nowy	5W40	5W30 zużyty	5W30 nowy	5W40
Siła tarcia [N]						
10	70,1	81,92	31,49	100,4	108,4	60,7
15	214,2	178,4	197,22	209,8	189,7	195,9
20	299,9	259	206,5	197,7	257,8	261,7
Zużycie liniowe stopu łożyskowego CuPb30 [μm]						
10	2,9	3,3	5,1	9,9	25,8	37,9
15	5	24,1	16,6	20,5	29,2	38,4
20	13,2	17,9	19,7	9,2	27,8	33,9
Zużycie wagowe stopu łożyskowego CuPb30 [mg]						
10	88,2	59,4	49,4	197,3	519,1	526,8
15	156,1	174,2	229,2	345,3	550,6	578,5
20	154,9	289,7	351,6	366,5	587,4	619,1
Temperatura w obszarze tarcia [$^{\circ}\text{C}$]						
10	52,1	45,5	42,2	50,9	49,2	54,1
15	83,2	57,2	61,9	65,4	67,7	75,7
20	83,3	82,2	83,5	69,7	78,5	78,8

jednostkowego, więc najniższe wartości temperatury zarejestrowano w badaniach przy nacisku 10 MPa, a najwyższe przy nacisku 20 MPa (rys. 5.4).

Badania inicjowano każdorazowo po ustabilizowaniu temperatury układu w zakresie 25–28 $^{\circ}\text{C}$. Przy naciskach jednostkowych 10 MPa, na koniec badań najniższą temperaturę odnotowano w parze ciernej smarowanej olejem silnikowym 5W40 i z próbką stalową ulepszaną cieplnie, gdzie temperatura wyniosła 42,2 $^{\circ}\text{C}$. Nieznacznie wyższą temperaturę 45,5 $^{\circ}\text{C}$ zmierzono w parze ciernej smarowanej olejem 5W30 nowym i również z próbką stalową ulepszaną cieplnie (rys. 5.4a). Najszybszy przyrost temperatury odnotowano w parze ciernej z użyciem jako środka smarnego oleju 5W40 i z próbką z powłoką a-C:H:W. Również wartość temperatury w obszarze tarcia

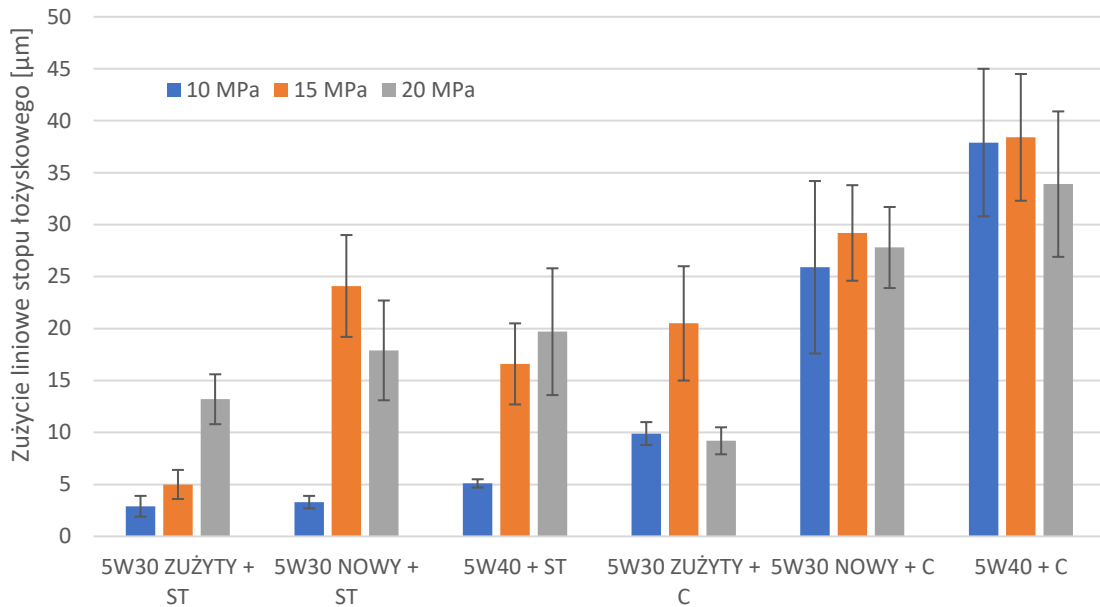


Rysunek 5.4. Temperatura w obszarze styku par ciernych smarowanych olejami silnikowymi 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40 w funkcji czasu przy naciskach jednostkowych: a) 10 MPa, b) 15 MPa, c) 20 MPa; (ST- z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie, C- z próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W)

w końcowej fazie badań była przy naciskach 10 MPa najwyższa dla tej kompozycji pary cierniej, wynosząc 54,1 °C. Nieznacznie mniejszą wartość temperatury, 52,1 °C osiągnęła para cierna smarowana olejem 5W30 zużytym i z próbką pierścieniową ulepszaną

cieplnie. W badaniach przy naciskach 15 MPa, maksymalna wartość temperatury zmierzono w obszarze styku pary ciernej smarowanej olejem 5W30 zużytym i z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie – 83,2 °C. Temperatura najszybciej wzrosła natomiast w parze ciernej smarowanej olejem 5W40 i z próbką z powłoką węglową, by na koniec badania osiągnąć 75,7 °C. Najniższą wartość na końcu badania odnotowano w przypadku skojarzenia ciernej smarowanego olejem 5W30 nowym i z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie – 57,2 °C. Różnica pomiędzy najniższą a najwyższą wartością temperatury przy naciskach 15 MPa wyniosła 26 °C (rys. 5.4b). Zmiany wartości temperatury w obszarach tarcia par ciernych przy naciskach 20 MPa, były zbliżone dla wszystkich par ciernych, jedyne odstępstwo wystąpiło w parze ciernej smarowanej olejem silnikowym 5W30 zużytym i z próbką ulepszaną cieplnie, gdzie temperatura w obszarze styku wzrastała wolniej w porównaniu do reszty par ciernych. W końcowej fazie badań temperatura w tej parze ciernej osiągnęła wartość 83,3 °C (rys. 5.4c). Najwyższą temperaturę w obszarze tarcia, 83,5 °C na koniec badania odnotowano w skojarzeniach ciernych smarowanych olejem 5W40 i z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie. Nieznacznie mniejszą temperaturę osiągnęła para cierna smarowana olejem 5W30 nowym i również z próbką ulepszaną cieplnie, 82,2 °C. Najniższa temperatura to wartość 69,7 °C, została zmierzona w parze ciernej z użyciem oleju silnikowego 5W30 zużytego i z próbką z powłoką a-C:H:W. Różnica pomiędzy najwyższą a najniższą wartością temperatury przy naciskach 20 MPa wyniosła 13,8 °C. Przy naciskach 20 MPa zauważono jednoznacznie niższe temperatury w obszarze styku w skojarzeniach ciernych, w których użyto próbki pierścieniowej z powłoką węglową.

Porównując temperatury w obszarze tarcia badanych par ciernych dla ustalonych nacisków, można wskazać, że różnica pomiędzy najniższą temperaturą w obszarze tarcia 42,2 °C (odnotowaną przy nacisku 10 MPa w parze ciernej smarowanej olejem silnikowym 5W40 i z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie) a najwyższą temperaturą 83,5 °C (odnotowaną przy nacisku 20 MPa) w parze ciernej o tej samej kompozycji, wynosi 41,3 °C (niemal 98%). W badaniach przy naciskach 10 i 15 MPa zaobserwowano w parach ciernych z użyciem próbek pierścieniowych z powłokami węglowymi z użyciem oleju silnikowego 5W30 nowego oraz oleju 5W40 większe wartości w porównaniu do par ciernych stosujących próbki pierścieniowe ulepszone cieplnie, gdzie różnica dla 10 i 15 MPa wynosiła kolejno 8% i 18% więcej dla pary ciernej smarowanej olejem 5W30 nowym i próbki z powłoką węglową oraz 28% i 22% dla skojarzenia ciernej smarowanego olejem 5W40 i z próbką z powłoką węglową.

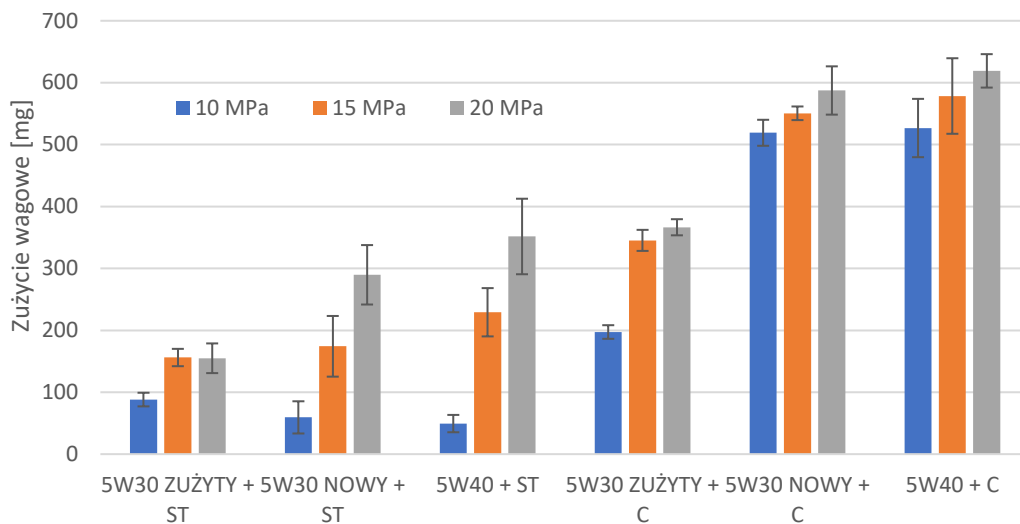


Rysunek 5.5. Zużycie liniowe stopu łożyskowego CuPb30 w funkcji nacisków jednostkowych, przy smarowaniu obszaru tarcia olejami silnikowymi: 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40; (ST- z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie, C- z próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W)

Zużycie liniowe stopu łożyskowego CuPb30, pokazało istotny wpływ nacisków jednostkowych, rodzaju i stanu oleju silnikowego i ukształtowanej technologicznie warstwy powierzchniowej na procesy zużycia w obszarze styku pary ciernej (rys. 5.5). Zaobserwowano znacznie większe zużycie liniowe przeciwpróbek ze stopu łożyskowego CuPb30 w par ciernych z próbkami pierścieniowych z powłokami węglowymi a-C:H:W. Wyższe wartości zużycia liniowego zarejestrowano na ogół przy nacisku jednostkowym 15 MPa. Wyjątek stanowiły dwie pary cierne z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie, smarowane olejem 5W30 zużytym oraz olejem 5W40, dla których większe zużycie liniowe zarejestrowano przy nacisku jednostkowym 20 MPa (rys. 5.5). Zużycie liniowe stopu łożyskowego w skojarzeniu ciernym smarowanym olejem silnikowym 5W40 i z próbką pierścieniową z powłoką węglową przy nacisku 10 MPa wyniosło 37,9 μm, przy nacisku 15 MPa było równe 38,4 μm, a przy nacisku 20 MPa uzyskało wartość 33,9 μm. W parze ciernej smarowanej tym samym olejem 5W40 lecz z próbką pierścieniową stalową ulepszaną cieplnie przy naciskach jednostkowych 10 MPa zużycie liniowe wyniosło jedynie 5,1 μm. Oznacza to, że zużycie liniowe stopu łożyskowego w skojarzeniu z powłoką węglową było około 643% większe niż w skojarzenia z próbką ulepszaną cieplnie. Przy naciskach jednostkowych 15 MPa w obszarze styku, wartość zużycia przeciwpróbki wyniosła 16,6 μm w parze ciernej smarowanej olejem 5W40 i z próbką pierścieniową ulepszana cieplnie (o 131% mniej niż w parze ciernej z tym

samym olejem i z próbką z powłoką węglową). Przy najwyższym nacisku 20 MPa, w omawianym skojarzeniu ciernym stosującym próbki pierścieniowe ulepszone cieplnie, wartość zużycia liniowego stopu łożyskowego była największa, wynosząc 19,7 μm , co było wartością o 72% mniejszą w porównaniu do pary ciernej smarowanej olejem 5W40 i z próbką z powłoką a-C:H:W (33,9 μm). W badaniach zużycia liniowego par smarowanych olejem 5W30 nowym i z próbką z powłoką węglową wartości zużycia wynosiły odpowiednio 25,8 μm , 29,2 μm oraz 27,8 μm dla 10 MPa, 15 MPa i 20 MPa. W skojarzeniach ciernych smarowanych tym samym olejem 5W30 nowym i z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie, zużycie wyniosło 3,3 μm dla 10 MPa, 24,1 μm dla 15 MPa oraz 17,9 μm dla 20 MPa. Różnice pomiędzy tymi skojarzeniami ciernymi wynosiły przy naciskach jednostkowych 10 MPa 682%, w naciskach 15 MPa różnica wyniosła 21%, natomiast przy naciskach 20 MPa zarejestrowano różnicę równą 55%. Istotną różnicę w zużyciu liniowym wybranych skojarzeń ciernych zaobserwowano przy najniższych naciskach jednostkowych 10 MPa.

W parach ciernych smarowanych olejem silnikowym 5W30 zużyтым i z obiema próbkami pierścieniowymi, wartości zużycia liniowego stopu liniowego były najniższe względem wszystkich pozostałych badanych par (rys. 5.4). W parze ciernej smarowanej olejem 5W30 zużyтым i z próbką pierścieniową z powłoką węglową, przy nacisku 10 MPa, zużycie liniowe wyniosło 9,9 μm , przy nacisku 15 MPa wzrosło do 20,5 μm i przy nacisku 20 MPa wartość zużycia wyniosła 9,2 μm . W parze ciernej smarowanej olejem 5W30 zużyтым i z próbką stalową ulepszaną cieplnie, wartości zużycia dla nacisków 10 MPa, 15 MPa i 20 MPa wynosiły kolejno 2,9 μm , 5 μm oraz 13,2 μm . Różnica pomiędzy tymi parami ciernymi w zależności od zastosowanej obróbki warstwy powierzchniowej wyniosła odpowiednio 241% dla nacisku 10 MPa, 310% dla nacisku 15 MPa oraz 43% dla nacisku 20 MPa, jednak w przypadku nacisku 20 MPa na korzyść pary ciernej smarowanej olejem 5W30 zużyтым i z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie (rys. 5.5). W porównaniu do smarowania olejem 5W30 nowym, zastosowanie oleju 5W30 zużytego spowodowało zmniejszenie zużycia liniowego stopu łożyskowego CuPb30 w parach ciernych z próbkami z powłoką węglową odpowiednio o 161% przy nacisku 10 MPa z 25,8 μm do 9,9 μm , o 42% przy 15 MPa (z 29,2 μm do 20,5 μm) oraz o 202% przy 20 MPa (z 27,8 μm do 9,2 μm), natomiast w parach z próbkami ulepszanych cieplnie zużycie przy 10 MPa wynosiło (3,3 a 2,9 μm) co stanowiło różnicę 14%, kolejno przy 15 MPa 382% (24,1 μm do 5 μm) oraz o 36% przy 20 MPa (z 17,9 μm do 13,2 μm).



Rysunek 5.6. Zużycie wagowe stopu łożyskowego CuPb30 w funkcji nacisków jednostkowych, przy smarowaniu obszaru tarcia olejami silnikowymi: 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40; (ST- z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie, C- z próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W)

Po próbach zużycia w styku konforemnym wykonano pomiary zużycia wagowego przeciwpróbek ze stopu łożyskowego CuPb30, jako różnica masy przed i po badaniach zużycia (rys. 5.6). W parach ciernych z użyciem jako środka smarnego oleju silnikowego 5W30 zużytego i z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie odnotowano ubytek masy stopu łożyskowego kolejno 88,2 mg, 156,1 mg oraz 154,9 mg przy naciskach jednostkowych 10, 15 i 20 MPa (rys. 5.6). Dla porównania w badaniach w skojarzeniach ciernych dla tego samego oleju 5W30 zużytego i z próbkami pierścieniowymi z powłoką węglową, ubytki masy były znacznie większe. Przy nacisku 10 MPa zużycie wyniosło 197,3 mg (o 124% większe niż w parze z próbką ulepszaną cieplnie), 345,3 mg przy nacisku 15 MPa (o 121% większe) oraz 366,5 mg przy nacisku jednostkowym 20 MPa (o 137% większe). W badaniach skojarzeń ciernych smarowanych olejem 5W30 nowym, przy naciskach jednostkowych 10, 15 i 20 MPa, zużycie stopu łożyskowego w parze cierniej z próbką ulepszaną cieplnie wynosiły kolejno: 59,4 mg, 174,2 mg i 289,7 mg. Zaś w skojarzeniu smarowanym olejem silnikowym 5W30 nowym i z próbką z powłoką a-C:H:W wyniki kolejno dla nacisków jednostkowych wynosiły 519,1 mg (o 774% więcej), 550,6 mg (o 216% więcej) oraz 587,4 mg (o 103% więcej). W badaniach z użyciem oleju silnikowego 5W40, badania wykazały największe wartości ubytku masy przeciwpróbek z stopu łożyskowego. W parach ciernych smarowanych olejem silnikowym 5W40 i z próbkami pierścieniowymi ulepszanymi cieplnie, dla nacisków 15 MPa oraz 20 MPa, obliczone zużycie wagowe stopu łożyskowego wyniosło kolejno 229,2 mg i 351,6 mg. W skojarzeniach ciernych z użyciem tego oleju (5W40)

i z próbkami pierścieniowymi z powłoką węglową, wartość zużycia stopu przeciwpróbki uzyskała wartość 578,5 mg przy nacisku 15 MPa (o 153% więcej niż w parach z próbkami ulepszanymi cieplnie) oraz 619,1 mg przy nacisku 20 MPa. To największa wartość ubytku masy z badanych par ciernych, stanowiąc o 76% większe zużycie niż w przypadku skojarzenia ciernego smarowanego olejem 5W40 i z próbką ulepszaną cieplnie przy tych samych naciskach. Jedynie w przypadku najniższego nacisku jednostkowego 10 MPa, w parze cierniej z olejem silnikowym 5W40 i z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie, te wartości były mniejsze od pozostałych, wynosząc 49,4 mg. Przy tych naciskach, z zastosowaniem w parze cierniej tego samego oleju i próbki z powłoką węglową a-C:H:W, wartość ubytku masy przeciwpróbki wyniosła 526,8 mg (różnica 966%). Skojarzenia cierne z zastosowanymi próbkami pierścieniowymi z powłoką węglową a-C:H:W wykazują znacznie większe ubytki masy przeciwpróbki ze stopu łożyskowego CuPb30.

5.1.3. Chropowatość warstw powierzchniowych elementów skojarzeń ciernych po badaniach w styku konforemnym

Po zakończonych badaniach zużyciowych skojarzeń ciernych w styku konforemnym wykonano pomiary parametrów chropowatości Ra, Rz, Rq i RSm, próbek pierścieniowych oraz przeciwpróbek z stopu łożyskowego CuPb30. Dla zobrazowania różnic, zmierzono te parametry również dla tych pierścieni oraz przeciwpróbek przed badaniami zużycia – próbki nowe (tab. 5.3). Pomiary parametrów chropowatości powierzchni Ra, Rz, Rq próbek pierścieniowych z pary cierniej smarowanej olejem 5W30 użytym po próbach przy naciskach jednostkowych 10 MPa, wykazały zauważalne zmniejszenie chropowatości powierzchni warstwy powierzchniowej. Zmierzone wartości parametrów chropowatości pierścienia ulepszanego cieplnie wyniosły Ra = 0,1 μm, Rz = 0,53 μm i Rq = 0,11 μm i były to wartości 52, 69 i 62 % mniejsze niż nowego pierścienia, a pierścienia z powłoką węglową wartości wyniosły Ra = 0,08 μm, Rz = 0,52 i Rq = 0,1 μm co stanowiło kolejno zmniejszenie o 67, 78 i 71 % w porównaniu do nowej powłoki węglowej na próbce pierścieniowej. Parametr RSm = 92,2 μm (próbka pierścieniowa ulepszana cieplnie) i 96,2 μm (próbka z powłoką węglową) i wzrósł o 179 i 172 % w porównaniu do tego parametru zmierzonego na nowej próbce pierścieniowej. Wartości parametrów Ra, Rz i Rq przeciwpróbki z stopu łożyskowego wyniosły 0,18, 1,3, 0,23 μm i były mniejsze o 58, 71 i 65 %, a RSm = 70 μm był większy o 6 % po współpracy z powłoką węglową w porównaniu do nowych przeciwpróbek ze stopu

Tabela 5.3. Chropowatość powierzchni elementów par ciernych po badaniach w styku konforemnym przy sile nacisku 10 MPa

Skojarzenie pary cierniej		Próbki pierścieniowe ulepszone cieplnie – przeciwpróbki CuPb30				Próbka pierścieniowa z powłoką a-C:H:W – przeciwpróbka CuPb30			
Elementy pary		Pierścień		Przeciwpróbka		Pierścień		Przeciwpróbka	
Próbki przed badaniami zużycia									
Parametr		Wartość [μm]		Wartość [μm]		Wartość [μm]		Wartość [μm]	
Ra		0,21		0,43		0,24		0,43	
Rz		1,71		4,51		2,35		4,51	
Rq		0,26		0,65		0,34		0,65	
RSm		33		66		35,4		66	
Próbki po badaniach zużycia									
Olej	Parametr	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]
5W30 zużyty	Ra	0,1	-52	0,65	51	0,08	-67	0,18	-58
	Rz	0,53	-69	4,37	-3	0,52	-78	1,3	-71
	Rq	0,10	-62	0,85	31	0,10	-71	0,23	-65
	RSm	92,2	179	131	98	96,2	172	70	6
5W30 nowy	Ra	0,14	-33	0,33	-23	0,16	-33	0,29	-33
	Rz	0,76	-56	2,32	-49	0,99	-58	1,77	-61
	Rq	0,17	-35	0,41	-37	0,20	-41	0,36	-45
	RSm	193	484	43,1	-35	98,6	178	119	81
5W40	Ra	0,07	-67	0,15	-65	0,10	-58	0,19	-56
	Rz	0,41	-76	1,05	-77	0,64	-73	1,21	-73
	Rq	0,09	-65	0,19	-71	0,13	-62	0,24	-63
	RSm	87,3	165	111	68	81,6	131	108	64

łożyskowego CuPb30. W styku ciernym z warstwą powierzchniową ulepszaną cieplnie tylko parametr $Rz = 4,37 \mu\text{m}$ nieznacznie się zmniejszył (3%), a pozostałe parametry wzrosły $Ra = 0,65$ o 51%, $Rq = 0,85$ o 31% i $RSm = 131$ o 98%. Smarowane par ciernych olejem 5W30 nowym również wpłynęło na zmniejszenie chropowatości powierzchni, przy czym procentowe zmiany były mniejsze niż w parach smarowanych olejem zużytych. W parze cierniej z próbką z powłoką a-C:H:W zarówno chropowatość powierzchni próbki pierścieniowej i przeciwpróbki zmniejszyła się (Ra o 33%, Rz o 58% i Rq o 41% - próbka pierścieniowa i Ra o 33%, Rz o 61% i Rq o 45% -przeciwpróbka). Parametr RSm wzrósł o 178 i 81% i wyniósł $98,6 \mu\text{m}$ (próbka pierścieniowa z powłoką) i $119 \mu\text{m}$ (przeciwpróbka z stopu CuPb30). W parze cierniej z próbką ulepszaną cieplnie również chropowatości powierzchni zmniejszyła się na obu elementach pary, przy czym istotne zmniejszenie w porównaniu z smarowaniem olejem zużytych odnoszą się do warstwy powierzchniowej przeciwpróbki, gdzie wszystkie parametry były mniejsze; $Ra = 0,33 \mu\text{m}$ - mniejszy o 23%, $Rz = 2,32 \mu\text{m}$ - o 49%, $Rq = 0,41 \mu\text{m}$ - o 37% i $RSm = 43,1 \mu\text{m}$ o 35%. Smarowanie par ciernych olejem 5W40 spowodowało zmniejszenie chropowatości próbek pierścieniowych, ale poziom procentowy zmian jest

zbliżony do wyznaczonych w parach ciernych smarowanych olejem 5W30 zużyтым. Chropowatość próbek pierścieniowych jest podobna dla obu warstw powierzchniowych i na ulepszanej cieplnie wyniosła $R_a = 0,07 \mu\text{m}$ (-67%), $R_z = 0,41 \mu\text{m}$ (-76%) i $R_q = 0,09 \mu\text{m}$ (-65%) a na powłoce a-C:H:W $R_a = 0,1 \mu\text{m}$ (-58), $R_z = 0,64 \mu\text{m}$ (-73%) i $R_q = 0,13 \mu\text{m}$ (-62%). Parametr RSm wzrósł na obu współpracujących elementach pary ciernej, jednakże wartość parametru RSm powłoki a-C:H:W jest znacznie niższa. Pomiar przeciwpróbek z stopu łożyskowego w tych warunkach smarowania wykazały mniejszą chropowatość po współpracy z próbkami pierścieniowymi ulepszanymi cieplnie $R_a = 0,15 \mu\text{m}$, $R_z = 1,05 \mu\text{m}$ i $R_q = 0,19 \mu\text{m}$, niż po współpracy z powłoką $R_a = 0,19 \mu\text{m}$, $R_z = 1,21 \mu\text{m}$ i $R_q = 0,24 \mu\text{m}$ co jest odróżnialne od pomiarów elementów ciernych w parach smarowanych olejem 5W30 nowym i zużyтым. Parametr chropowatość RSm przeciwpróbek z stopu CuPb30 wzrósł w obu skojarzeniach ciernych o zbliżona wartość procentową. Porównując zmierzone wartości parametry chropowatości powierzchni elementów pary ciernej przy naciskach jednostkowych 10 MPa nie można wyznaczyć jednej tendencji zmian wskazujące na jednoznaczny wpływ kompozycji obróbki powierzchniowej próbki pierścieniowej i stanu oleju smarującego na kształtowanie struktury geometrycznej w styku ciernym (tab. 5.3).

Tabela 5.4. Chropowatość powierzchni elementów par ciernych po badaniach w styku konforemnym przy sile nacisku 15 MPa

Skojarzenie pary ciernej		Próbki pierścieniowe ulepszone cieplnie – przeciwpróbki CuPb30				Próbka pierścieniowa z powłoką a-C:H:W – przeciwpróbka CuPb30			
Elementy pary		Pierścień		Przeciwpróbka		Pierścień		Przeciwpróbka	
Olej	Parametr	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]
5W30 zużyty	Ra	0,12	-42,8	0,73	69,7	0,25	4,1	0,32	-25,5
	Rz	0,79	-53,8	5,84	29,4	1,79	-23,8	1,85	-58,9
	Rq	0,16	-38,4	0,95	46,1	0,32	-5,8	0,38	-41,5
	RSm	97,5	195,4	161	143,9	57,9	63,5	131	98,4
5W30 nowy	Ra	0,08	-61,9	0,33	-23,2	0,12	-50	0,21	-51,1
	Rz	0,50	-70,7	2,54	-43,6	0,87	-62,9	1,33	-70,5
	Rq	0,10	-61,5	0,44	-32,3	0,15	-55,8	0,26	-60
	RSm	82	148,4	84,2	27,5	34,3	-3,1	95,4	44,5
5W40	Ra	0,05	-76,1	0,19	-55,8	0,21	-12,5	0,21	-51,1
	Rz	0,44	-74,2	1,87	-58,5	1,23	-47,6	1,67	-62,9
	Rq	0,09	-65,3	0,26	-60	0,26	-23,5	0,29	-55,3
	RSm	107	224,2	56,2	-14,8	64,9	83,3	56,3	-14,6

Porównując wpływ rodzaju oleju oraz sposobu obróbki warstwy powierzchniowej przy nacisku 15 MPa stwierdzono, że olej silnikowy 5W30 nowy spowodował znaczne zmniejszenie parametrów chropowatości próbek pierścieniowych ulepszanych cieplnie niż olej silnikowy 5W30 zużyty. Wartości parametrów R_a , R_z i R_q wyniosły odpowiednio

0,08 μm , 0,50 μm i 0,10 μm (spadek o 62%, 70% i 61%), podczas gdy dla oleju zużytego wartości te były wyższe i wynosiły 0,12 μm , 0,79 μm oraz 0,16 μm (spadek o 43%, 54% i 38%). Jednocześnie parametr RSm osiągnął 82 μm dla oleju 5W30 nowego oraz 97,5 μm dla oleju silnikowego 5W30 zużytego, co oznaczało wzrost odpowiednio o 148% i 195% względem nowych próbek. W przypadku przeciwpróbek ze stopu CuPb30 po smarowaniu olejem silnikowym 5W30 użytym odnotowano wzrost parametrów chropowatości do wartości $R_a = 0,73 \mu\text{m}$, $R_z = 5,84 \mu\text{m}$, $R_q = 0,95 \mu\text{m}$ oraz $R_{Sm} = 161 \mu\text{m}$, co odpowiadało wzrostowi odpowiednio o 70%, 29%, 46% i 144%, natomiast dla oleju silnikowego 5W30 nowego wartości parametrów były znacznie niższe i wynosiły 0,33 μm , 2,54 μm , 0,44 μm oraz 84,2 μm , co oznaczało zmniejszenie o 23%, 44%, 32% oraz wzrost RSm o 27%. Pomiar parametrów chropowatości powierzchni R_a , R_z i R_q próbek pierścieniowych z powłoką a-C:H:W po badaniach zużyciowych prowadzonych przy naciskach jednostkowych 15 MPa w skojarzeniu ciernym smarowanym olejem silnikowym 5W30 użytym wykazały niewielkie zmiany chropowatości warstwy powierzchniowej. Zmierzone wartości parametrów dla próbki pierścieniowej z powłoką a-C:H:W wyniosły odpowiednio: $R_a = 0,25 \mu\text{m}$, $R_z = 1,79 \mu\text{m}$ oraz $R_q = 0,32 \mu\text{m}$. W porównaniu do nowej próbki pierścieniowej z powłoką węglową parametr R_a zwiększył się o 4,1%, natomiast parametry R_z i R_q zmniejszyły się odpowiednio o 24 i 6%. Parametr RSm osiągnął wartość 57,9 μm i był większy o 64% względem nowej próbki pierścieniowej z powłoką a-C:H:W. Wartości parametrów chropowatości przeciwpróbki ze stopu CuPb30 wyniosły $R_a = 0,32 \mu\text{m}$, $R_z = 1,85 \mu\text{m}$ oraz $R_q = 0,38 \mu\text{m}$ i były mniejsze odpowiednio o 25, 59 i 42% w porównaniu do nowej przeciwpróbki. Parametr RSm przeciwpróbki wyniósł 131 μm i zwiększył się o 98%. Smarowanie par ciernych olejem silnikowym 5W30 nowym spowodowało zmniejszenie wartości wszystkich parametrów chropowatości powierzchni próbki pierścieniowej z powłoką a-C:H:W. Parametry R_a , R_z i R_q wyniosły odpowiednio 0,12, 0,87 i 0,15 μm , co stanowiło zmniejszenie o 50, 63 i 56% względem nowych próbek pierścieniowych z powłoką węglową. Parametr RSm wyniósł 34,3 μm i był mniejszy o 3% w porównaniu do nowej próbki pierścieniowej. W przypadku przeciwpróbki ze stopu CuPb30 wartości parametrów $R_a = 0,21 \mu\text{m}$, $R_z = 1,33 \mu\text{m}$ oraz $R_q = 0,26 \mu\text{m}$ były niższe odpowiednio o 51, 70 i 60% względem nowej przeciwpróbki. Parametr RSm osiągnął wartość 95,4 μm i zwiększył się o 45% (tab. 5.4). W parach ciernych smarowanych olejem 5W40 również odnotowano zmniejszenie parametrów chropowatości powierzchni próbki pierścieniowej z powłoką a-C:H:W. Wartości parametrów wyniosły odpowiednio:

Ra = 0,21 μm , Rz = 1,23 μm oraz Rq = 0,26 μm , co oznacza zmniejszenie odpowiednio o 13, 48 i 24% względem nowych próbek pierścieniowych z powłoką węglową. Parametr RSm osiągnął wartość 64,9 μm i zwiększył się o 83%. Pomiary przeciwpróbek ze stopu CuPb30 wykazały wartości parametrów Ra = 0,21 μm , Rz = 1,67 μm oraz Rq = 0,29 μm , co oznaczało zmniejszenie odpowiednio o 51, 63 i 55% względem nowych przeciwpróbek. Parametr RSm przeciwpróbki wyniósł 56,3 μm i był mniejszy o 15%. W parach ciernych stosujących próbki pierścieniowe z powłoką a-C:H:W obserwowano na ogół większe wartości parametrów chropowatości powierzchni Ra, Rz i Rq w porównaniu do próbek ulepszanych cieplnie, przy jednocześnie niższych wartościach parametru RSm. W większości analizowanych przypadków wzrost nacisków jednostkowych powodował zmniejszenie wartości parametrów chropowatości powierzchni badanych elementów par ciernych.

Tabela 5.5. Chropowatość powierzchni elementów par ciernych po badaniach w styku konforemnym przy sile nacisku 20 MPa

Skojarzenie pary cierniej		Próbki pierścieniowe ulepszone cieplnie – przeciwpróbki CuPb30				Próbka pierścieniowa z powłoką a-C:H:W – przeciwpróbka CuPb30			
Elementy pary		Pierścień		Przeciwpróbka		Pierścień		Przeciwpróbka	
Olej	Parametr	Wartość μm	Zmiana [%]	Wartość μm	Zmiana [%]	Wartość μm	Zmiana [%]	Wartość μm	Zmiana [%]
5W30 zużyty	Ra	0,43	104,7	0,59	37,2	0,56	133,3	0,45	4,6
	Rz	2,9	69,5	4,1	-9	3,65	55,3	2,84	-37
	Rq	0,54	107,6	0,76	16,9	0,69	102,9	0,57	-12,3
	RSm	37,4	13,3	60,3	-8,6	54,6	54,2	104	57,5
5W30 nowy	Ra	0,34	61,9	0,18	-58,1	0,63	162,5	0,45	4,6
	Rz	1,99	16,3	3,39	-24,8	4,74	101,7	2,88	-36,1
	Rq	0,51	96,1	0,51	-21,5	0,81	138,2	0,55	-15,3
	RSm	39,4	19,3	66,2	0,3	41,9	18,3	77,1	16,8
5W40	Ra	0,48	128,5	0,45	4,6	0,90	275	0,53	23,2
	Rz	3,31	93,5	5,61	24,3	5,93	152,3	2,97	-34,1
	Rq	0,61	134,6	0,74	13,8	1,13	232,3	0,64	-1,5
	RSm	54,2	64,2	72,6	10	59,3	67,5	113	71,2

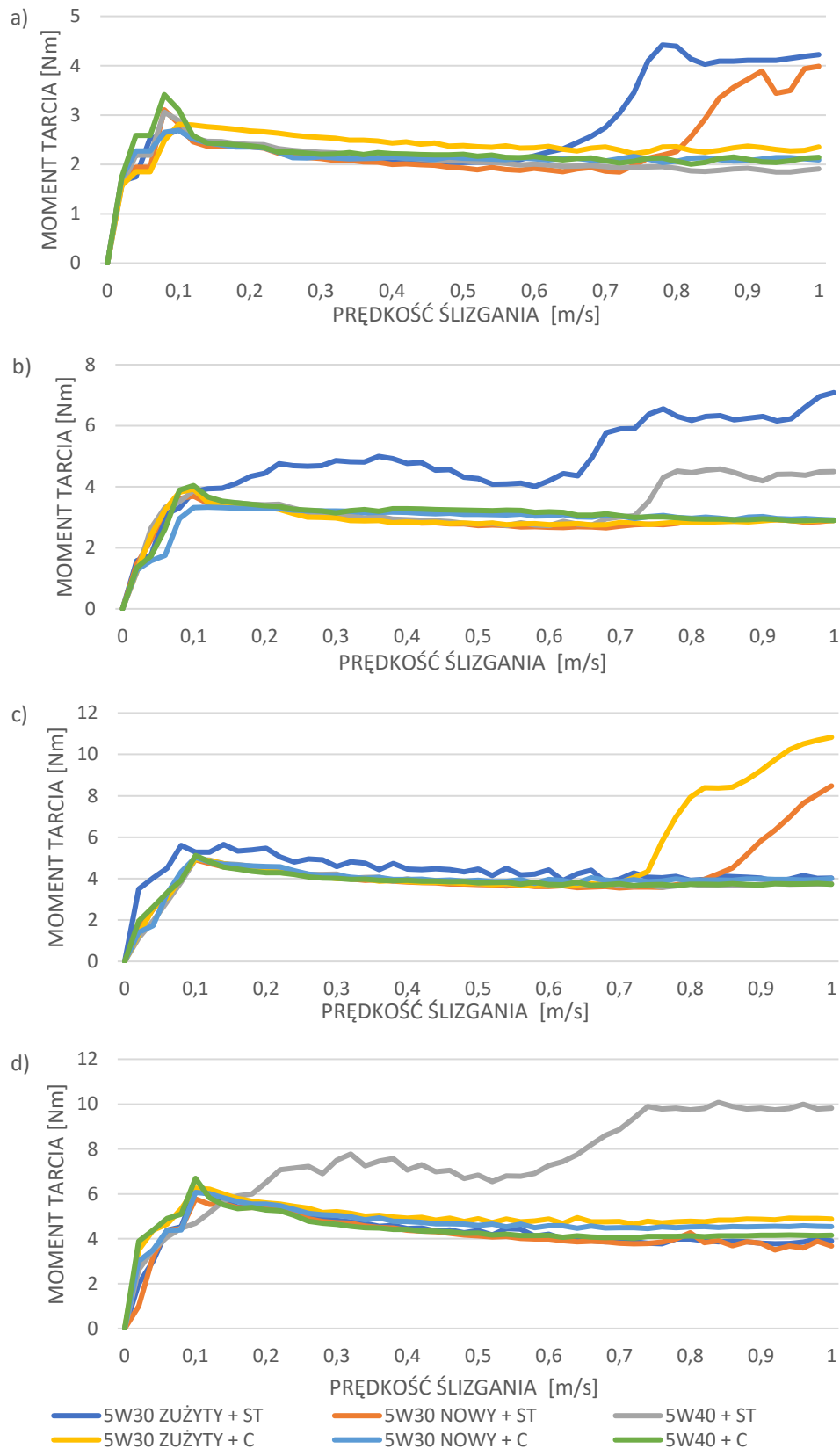
Pomiary parametrów chropowatości powierzchni próbek pierścieniowych ulepszanych cieplnie po badaniach przy naciskach jednostkowych 20 MPa wykazały wzrost wartości parametrów Ra, Rz i Rq względem nowych próbek pierścieniowych, szczególnie w parach ciernych smarowanych olejem silnikowym 5W30 zużytym oraz 5W40 (tab. 5.5). W przypadku oleju silnikowego 5W30 zużytego wartości parametrów próbki pierścieniowej wyniosły: Ra = 0,43 μm , Rz = 2,9 μm , Rq = 0,54 μm i RSm = 37,4 (wzrosty o 105, 70 i 107 i 13%). Parametry Ra i Rq na przeciwpróbce ze stopu CuPb30 zwiększyły się odpowiednio o 37 i 17%, natomiast parametr Rz zmniejszył się o 9%. W parach ciernych smarowanych olejem silnikowym 5W30 nowym parametry Ra, Rz

i Rq osiągnęły odpowiednio 0,34, 1,99 i 0,51 μm , co oznaczało wzrost o 62, 16 i 96%. Jednocześnie na przeciwpróbkach ze stopu CuPb30 wartości parametrów Ra, Rz i Rq były niższe odpowiednio o 58, 25 i 22% względem nowych przeciwpróbek. Największy wzrost parametrów chropowatości powierzchni próbek ulepszanych cieplnie odnotowano w parach ciernych smarowanych olejem silnikowym 5W40. Parametry Ra, Rz i Rq próbki pierścieniowej wyniosły odpowiednio 0,48, 3,31 i 0,61 μm , co oznaczało wzrost o 129, 94 i 135% względem nowych próbek pierścieniowych. W przypadku przeciwpróbek ze stopu CuPb30 obserwowano zarówno wzrost, jak i zmniejszenie wartości parametrów chropowatości powierzchni w zależności od rodzaju oleju smarującego. W parach ciernych z próbkami pierścieniowymi pokrytymi powłoką a-C:H:W przy naciskach 20 MPa przy smarowaniu olejem 5W30 zużytych parametry Ra, Rz i Rq osiągnęły wartości odpowiednio 0,56, 3,65 i 0,69 μm , co stanowiło wzrost o 133, 55 i 103% względem nowych próbek. Przy smarowaniu oleju 5W30 nowym wzrost parametrów był jeszcze większy i wyniósł odpowiednio 163, 102 i 138% (Ra = 0,633 μm , Rz = 4,74 μm i Rq = 0,81 μm) natomiast najwyższe wartości odnotowano przy smarowaniu olejem 5W40, gdzie parametry Ra, Rz i Rq osiągnęły odpowiednio 0,90, 5,93 i 1,13 μm . W analizowanych warunkach smarowania odnotowano także wzrost wartości parametru RSm. Porównując wartości parametrów chropowatości powierzchni elementów par ciernych przy naciskach jednostkowych 20 MPa można stwierdzić, że próbki pierścieniowe z powłoką a-C:H:W w większości przypadków osiągały większe wartości parametrów Ra, Rz i Rq niż próbki ulepszone cieplnie. Największe wartości parametrów Ra, Rz i Rq zarejestrowano dla próbki z powłoką a-C:H:W współpracującej w parze ciernej smarowanej olejem 5W40.

5.2. Procesy tribologiczne par ciernych ze stykiem niekonforemnym

5.2.1. Warunki tarcia w parach ciernych

Badania par ciernych ze stykiem niekonforemnym przeprowadzone w początkowej fazie testu umożliwiły wyznaczenie momentu rozruchowego w funkcji obciążenia obszaru tarcia i jego kompozycji materiałowej. W badaniach rozruchu skojarzeń ciernych przy sile nacisku 1200 N, najbardziej korzystny przebieg momentu tarcia zarejestrowano w parze ciernej smarowanej olejem silnikowym 5W30 nowym



Rysunek 5.7. Moment rozruchowy w parach ciernych smarowanych olejami silnikowymi 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40 w funkcji prędkości ślizgania przy siłach nacisku a) 1200 N, b) 1800 N, c) 2400 N, d) 3000 N; (ST- z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo, C- z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W)

i z płytką zaworową z powłoką węglową a-C:H:W, gdzie wartość maksymalnego momentu rozruchowego wyniosła 2,77 Nm. Przebieg momentu tarcia w tej parze charakteryzował się stabilną tendencją spadkową, co świadczyć może o powstawaniu korzystnych warunków tarcia w obszarze styku w porównaniu do innych prób (rys. 5.7a).

Największy rozruchowy moment tarcia przy tej sile nacisku zaobserwowano w parze ciernej przy stosowaniu oleju silnikowego 5W40 jako środek smarny i z płytką zaworową z powłoką węglową, gdzie moment rozruchu osiągnął wartość 3,41 Nm. Pary cierne z płytkami zaworowymi utwardzonymi powierzchniowo i smarowane olejami silnikowymi 5W40 oraz 5W30 nowy wykazały zbliżoną wartość momentu rozruchu równą 3,41 Nm (rys. 5.7a) i następnie trend spadku momentu tarcia wraz ze wzrostem prędkości ślizgania. Istotne zmiany obserwowane są natomiast w parach ciernych z płytkami zaworowymi utwardzonymi powierzchniowo i smarowanymi olejami 5W30 zużytym i 5W30 nowym, gdzie występuje znaczny wzrost momentu tarcia. W parze smarowanej olejem silnikowym 5W30 zużytym wzrost momentu tarcia rozpoczyna się przy prędkości około 0,65 m/s i przekracza wartość 4 Nm, a w parze smarowanej 5W30 nowym wzrost rozpoczyna się przy większej prędkości ślizgania ($V= 0,8$ m/s) i nie przekroczył 4Nm (rys. 5.7a).

W badaniach przy sile nacisku 1800 N, największe wartości momentów rozruchowych w badanych wszystkich parach ciernych były do siebie zbliżone, osiągając wartość od 3,71 Nm do 3,91 Nm. Para cierna smarowana olejem silnikowym 5W40 i z płytką zaworową z powłoką węglową osiągnęła 3,91 Nm, natomiast para cierna smarowana olejem silnikowym 5W30 nowym i z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo 3,71 Nm. Najniższą wartość momentu rozruchu zarejestrowano w przebiegu skojarzenia ciernego smarowanego olejem 5W30 nowym i z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W, gdzie wartość momentu wyniosła 3,29 Nm (rys. 5.7b). Przebiegi wartości momentów poszczególnych skojarzeń ciernych są do siebie zbliżone, po osiągnięciu największego momentu rozruchowego moment tarcia wykazuje tendencję spadkową wraz ze wzrostem prędkości ślizgania. Wyjątek stanowią dwa skojarzenie cierne: smarowane olejem silnikowym 5W30 zużytym i z płytką utwardzoną powierzchniowo, gdzie wartość momentu osiąga niemal 5 Nm przy prędkości ślizgania około 0,37 m/s, następnie obniża się do około 4 Nm przy 0,59 m/s i ponownie wzrasta by na końcu próby przekroczyć 7 Nm. Drugim przypadkiem jest skojarzenie cierne z tą samą płytką zaworową i smarowaniem olejem 5W30, jednak tutaj istotny wzrost

momentu wystąpił przy prędkości 0,72 m/s z wartości 2,99 Nm do 4,51 Nm, by przy prędkości ślizgania 0,84 m/s zanotować spadek i stabilizację oporów tarcia (rys. 5.7b).

Moment rozruchowy w parach ciernych przy sile nacisku 2400 N, dla większości par był na zbliżonym poziomie wartości w zakresie od 5,1 Nm do 5,61 Nm i z tendencją obniżania się wraz ze wzrostem prędkości ślizgania by przy zakończeniu próby wartość momentu tarcia wynosiła około 4Nm. Najwyższy moment rozruchowy 5,61 Nm zmierzono w parze ciernej smarowanej olejem silnikowym 5W30 zużytym i z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo (rys. 5.7c). W parze ciernej smarowanej olejem 5W30 zużytym i z płytką z powłoką a-C:H:W przy prędkości 0,72 m/s następuje istotny wzrost momentu tarcia i przy końcu próby wynosi on ponad 10Nm. Również w parze smarowanej olejem silnikowym 5W30 nowym i z płytką utwardzoną powierzchniowo, wartość momentu tarcia zaczyna wzrastać przy prędkości ślizgania 0,84 m/s, by przy prędkości 1 m/s przekroczyć 8 Nm (rys. 5.7c).

Siła nacisku 3000 N była największą siłą badania i w tych warunkach tarcia najmniejszą wartość momentu rozruchowego zmierzono w skojarzeniu ciernym smarowanym olejem silnikowym 5W40 i z płytką utwardzoną powierzchniowo i wyniósł on 4,87 Nm. Największą wartość momentu tarcia 6,69 Nm zarejestrowano w parze ciernej smarowanej olej silnikowym 5W40 i z płytką z powłoką a-C:H:W (rys. 5.7d). Większość skojarzeń ciernych po osiągnięciu maksymalnej wartości momentu rozruchowego, wykazuje tendencję do obniżania oporów tarcia wraz ze wzrostem prędkości ślizgania. Odstępstwem od tych trendów zmian jest moment tarcia w skojarzeniu ciernym smarowanym olejem silnikowym 5W40 i z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo. W tym skojarzeniu moment tarcia wzrasta od początku trwania próby by uzyskać największą wartość poniżej 8 Nm przy prędkości 0,32 m/s, następnie obniża się do wartości 6,55 Nm przy prędkości 0,55 m/s i ponownie gwałtownie wzrasta do niemal 10 Nm, gdzie następuje jego stabilizacja do końca próby (rys. 5.7d).

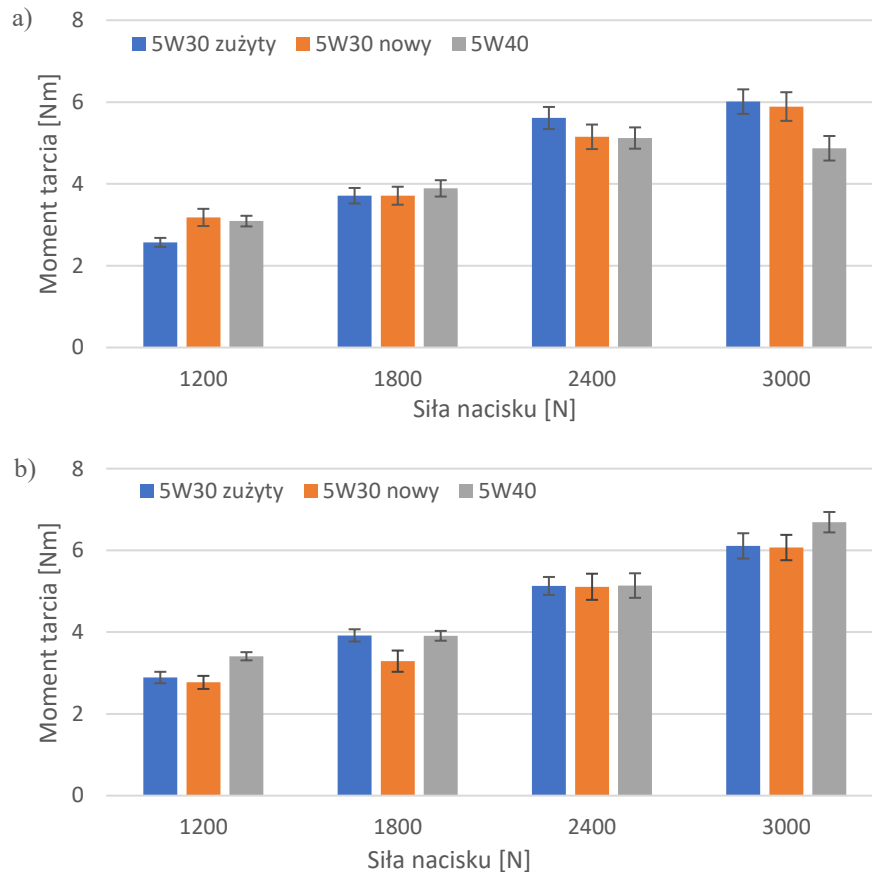
Największy moment rozruchowy w badanych parach ciernych wykazuje na ważne oddziaływanie zarówno siły nacisku, rodzaju zastosowanego oleju silnikowego i ukształtowania warstwy powierzchniowej elementu pary ciernej na procesy tarcia w fazie ich startu (tab. 5.6). Wraz ze wzrostem siły nacisku od 1200 N do 3000 N obserwowany jest systematyczny wzrost momentu rozruchowego we wszystkich badanych wariantach skojarzeń. Przy najniższej wartości obciążenia 1200 N, zauważalne są wyraźne różnice pomiędzy płytkami zaworowymi utwardzonymi powierzchniowo a płytkami zaworowymi z powłoką węglową a-C:H:W. W przypadku

par ciernych stosujących płytki z powłoką węglową wartości momentu tarcia są niższe przy smarowaniu olejem silnikowym 5W30 zużyty oraz 5W30 nowy, natomiast smarowanie olejem 5W40 wywołuje wzrost momentu tarcia w parach z płytkami utwardzonymi powierzchniowo. Może to świadczyć o odmiennym mechanizmie tworzenia filmu smarowego na powierzchni powłoki węglowej w zależności od lepkości oleju [121]. Przy obciążeniu 1800 N różnice pomiędzy badanymi wariantami ulegają zmniejszeniu, co może wskazywać na stabilizację warunków tarcia oraz przejście w bardziej ustalony reżim smarowania mieszanego. Wartości momentu tarcia dla obu typów płytek stają się porównywalne, szczególnie dla oleju silnikowego 5W40. W badaniach przy obciążeniu 2400 N wyniki większości skojarzeń ciernych momentu tarcia wynoszą około 5,13 Nm, natomiast w skojarzeniu ciernym z olejem silnikowym 5W30 zużyty i płytki zaworowej komercyjnej zarejestrowano wynik 5,61 Nm. Warto również zauważyć, że dla najwyższego obciążenia (3000 N) płytki zaworowe z powłoką węglową wykazują największe wartości momentu tarcia przy zastosowaniu oleju silnikowego 5W40. Może to wskazywać na pogorszenie warunków smarowania w wyniku zwiększonej lepkości oleju, która przy wysokich naciskach utrudnia skuteczne oddzielenie współpracujących powierzchni, co wpływa na warunki przepływu środka smarnego i może sprzyjać lokalnemu nie dosmarowaniu oraz wzrostowi tarcia [92].

Tabela 5.6. Maksymalny moment rozruchowy skojarzeń ciernych ze stykiem liniowym [Nm]

Skojarzenie cierne						
Siła nacisku [N]	Płytki zaworowe utwardzone powierzchniowo			Płytki zaworowe z powłoką węglową a-C:H:W		
	Rodzaj użytego oleju					
	5W30 zużyty	5W30 nowy	5W40	5W30 zużyty	5W30 nowy	5W40
1200	2,57	3,18	3,09	2,89	2,77	3,41
1800	3,71	3,71	3,89	3,92	3,29	3,91
2400	5,61	5,15	5,12	5,13	5,11	5,14
3000	6,01	5,89	4,87	6,11	6,07	6,69

Uzyskane wyniki potwierdzają skuteczność powłoki a-C:H:W w redukcji momentu tarcia przy niższych wartościach obciążenia, natomiast wraz ze wzrostem siły nacisku jej wpływ maleje na rzecz dominujących zjawisk kontaktowych w strefie tarcia (tab. 5.6). Porównując wartości największego momentu rozruchowego zarejestrowane



Rysunek 5.8. Maksymalny moment rozruchowy w parach ciernych smarowanych olejami silnikowymi 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40 w funkcji siły nacisku i stanu oleju silnikowego: a) płytkę zaworową utwardzoną powierzchniowo (komercyjna), b) płytkę zaworową z powłoką a-C:H:W

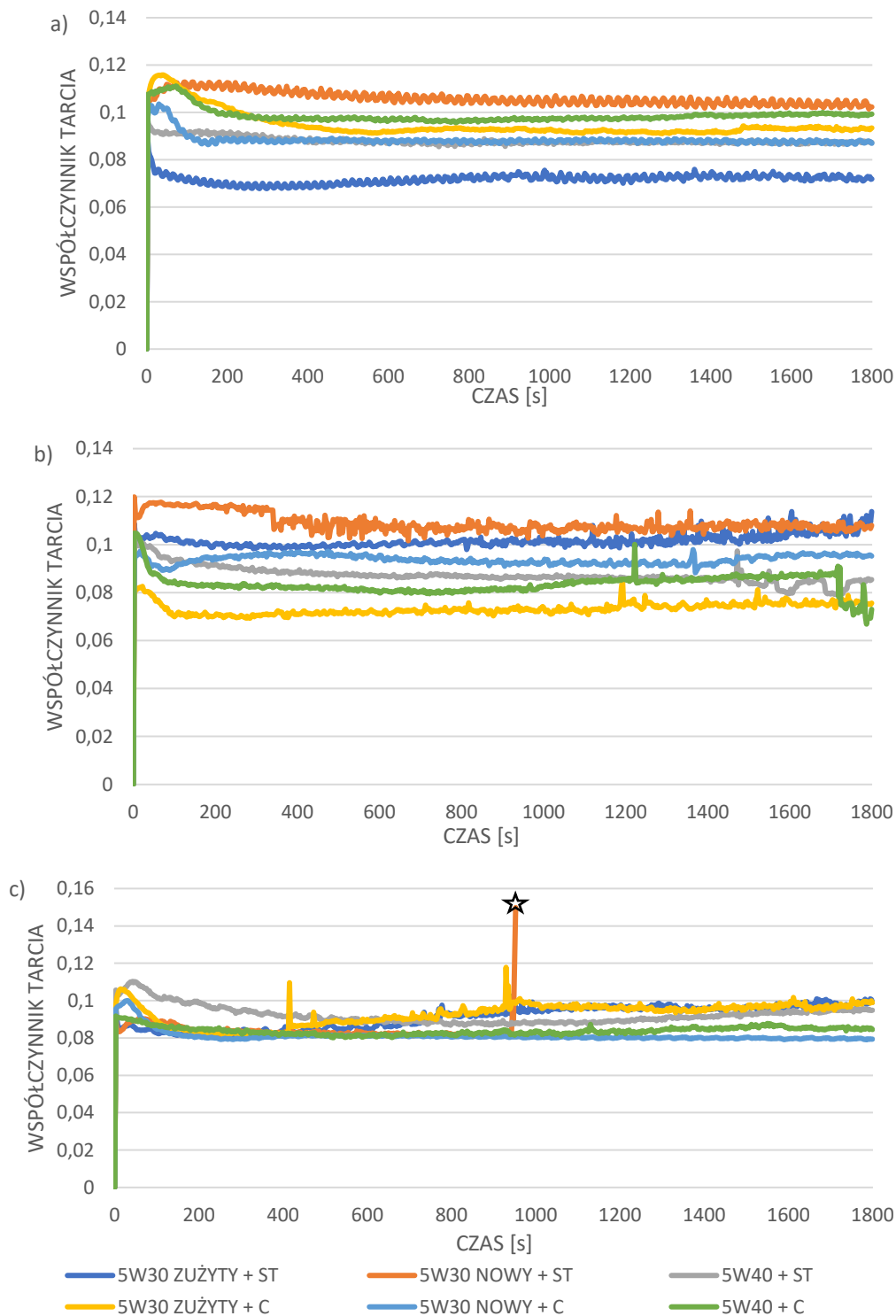
podczas rozruchu badanych par ciernych, można zaobserwować, że wzrost jego wartości jest nieproporcjonalny do wzrostu siły nacisku, w większości badanych par (rys. 5.8). Również wpływ ukształtowania warstwy powierzchniowej płytki zaworowej (utwardzona powierzchniowo bądź węglową a-C:H:W) nie pozwala na jednoznaczne określenie wpływu na procesy tarcia podczas rozruchu pary cierniej. Jednak można stwierdzić, że w parach ciernych smarowanych olejem silnikowym 5W40 i z płytką zaworową z powłoką węglową a-C:H:W, wartość momentu rozruchowego jest najwyższa niemal przy każdej sile nacisku (rys. 5.8b). Najniższą wartość momentu tarcia 2,57 Nm przy sile nacisku 1200 N zarejestrowano w skojarzeniu ciernym smarowanym olejem silnikowym 5W30 zużyty i płytki zaworowej komercyjnej (rys. 5.8a). W przypadku najniższego momentu tarcia z zastosowaniem płytki zaworowej z powłoką a-C:H:W, zarejestrowano w skojarzeniu smarowanym olejem silnikowym 5W30 nowym, wynosząc przy sile nacisku 1200 N 2,77 Nm. Największe wartości momentu tarcia 6 Nm zarejestrowano przy sile nacisku 3000 N w skojarzeniu ciernym z zastosowaniem płytki

zaworowej komercyjnej smarowanej olejem 5W30 zużyтым. W przypadku zastosowania płytki zaworowej z powłoką węglową największy moment tarcia zarejestrowano w parze ciernej smarowanej olejem 5W40 i wyniósł on 6,69 Nm (rys. 5.8b).

5.2.2. Zużycie pary ciernej ze stykiem niekonforemny

Badania zużycia par ciernych ze stykiem niekonforemny, prowadzonych w ustalonych warunkach obciążenia, obejmowały skojarzenia par ciernych z płytką zaworową komercyjną utwardzoną powierzchniowo oraz z płytką zaworową z ukształtowaną powłoką węglową a-C:H:W. W trakcie prób rejestrowano przebiegi siły tarcia, temperatury oraz sumarycznego zużycia liniowego elementów par ciernych w funkcji czasu trwania badania. Zmiany współczynnika tarcia w funkcji czasu trwania próby przy założonej prędkości 100 obr/min próbki pierścieniowej wykazały znaczne zmiany w oporze tarcia w zależności od nacisku jednostkowego i kompozycji pary ciernej. Podczas badań przy sile nacisku 1800 N współczynnik tarcia istotnie wzrasta w fazie startu węzła ciernej, a następnie po osiągnięciu największej wartości nieznacznie się obniża i przechodził w fazę stabilizacji. Najwyższy współczynnik tarcia odnotowano w skojarzeniu ciernym smarowanym olejem silnikowym 5W30 zużyтым i z płytką zaworową z powłoką węglową a-C:H:W, wyniósł on 0,12, następnie jego wartość spadła, by na koniec badania osiągnąć wartość około 0,09. Drugą najwyższą wartością współczynnika tarcia w tym badaniu, wynoszącą 0,11 zarejestrowano w parze ciernej smarowanej olejem 5W30 nowym i z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo, przy czym w tej parze nie obserwuje się trendu do zmniejszenia oporów tarcia zaraz po fazie startu, a tylko powolny spadek wraz z czasem trwania próby i na końcu próby współczynnik tarcia był na poziomie 0,11 (największa wartość współczynnika tarcia) (rys. 5.9a). Najmniejsze wartości współczynnika tarcia, odnotowano w skojarzeniu ciernym smarowanym olejem silnikowym 5W30 zużyтым i z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo, gdzie na początku badania wartość współczynnika tarcia w tej parze wyniosła 0,08, natomiast na końcu badania współczynnik tarcia obniżył się do 0,07.

Przy sile nacisku 2400 N wystąpiły ewidentnie zmiany oporów tarcia w porównaniu do tych zmierzonych w par ciernych przy naciskach 1800 N. Przebieg współczynnika tarcia nie jest już stabilny, a w jego przebiegu można zaobserwować okresowe skoki wartości. Najwyższe współczynnika tarcia 0,12 zmierzono w skojarzeniu ciernym smarowanym olejem silnikowym 5W30 nowym i z płytką zaworową



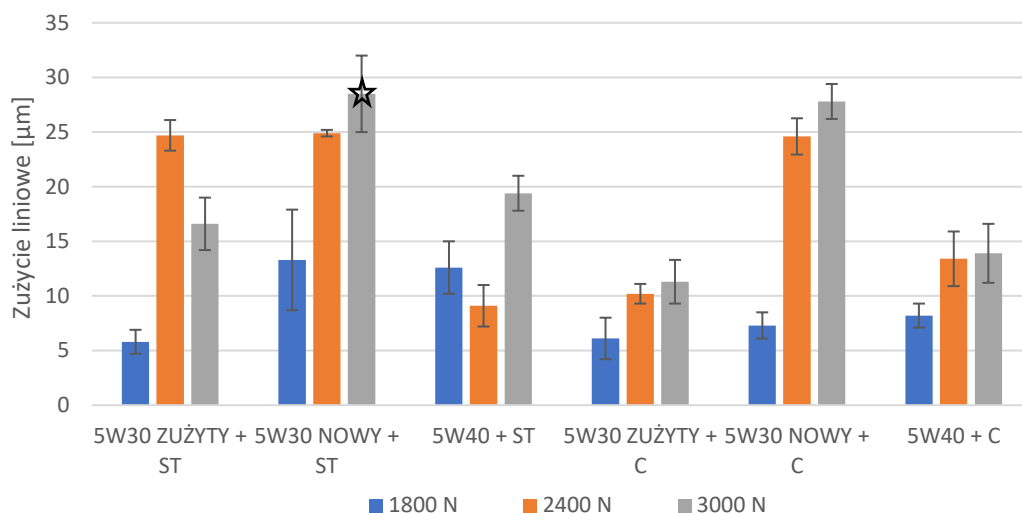
Rys. 5.9. Współczynnik tarcia w parach ciernych ze stykiem niekonforemnym, smarowanych olejami silnikowymi 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40 w funkcji czasu przy siłach nacisku: a) 1800 N, b) 2400 N, c) 3000N; (ST- z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo, C- z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W, * - zatarcie)

utwardzoną powierzchniowo i w skojarzeniu ciernym smarowanym olejem silnikowym 5W30 zużytym z tą samą płytką (rys. 5.9b).

Znaczącą różnicą w porównaniu do badań przy sile nacisku 1800 N, był przebieg wartości współczynnika tarcia w parze ciernej smarowanej olejem 5W30 zużyтым i z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W, gdzie wartość współczynnika tarcia przy sile nacisku równej 2400 N była najniższa wśród badanych par ciernych, osiągając wartość 0,08. W parze ciernej smarowanej olejem silnikowym 5W30 nowym z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W wartość współczynnika tarcia wyniosła 0,09, a z płytką utwardzoną powierzchniowo, 0,12 (rys. 5.9b).

W badaniach w styku niekonforemnym, największą zadaną siłą nacisku było 3000 N, przy którym wystąpiło zatarcie skojarzenia ciernego smarowanego olejem silnikowym 5W30 nowym i z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo w 859 s trwania próby (mimo wcześniejszego ustabilizowania się współczynnika tarcia na wartości 0,085). Największą wartość współczynnika tarcia 0,112 przy sile nacisku 3000 N, zarejestrowano w parze ciernej smarowanej olejem silnikowym 5W30 zużyтым i z płytką utwardzoną powierzchniowo. Nieco niższe wartości współczynnika tarcia 0,108 zmierzono w parze ciernej smarowanej olejem 5W30 zużyтым i z płytką zaworową z powłoką węglową. Najniższy współczynnik tarcia 0,091 wystąpił w parze ciernej smarowanej olejem 5W30 nowym i z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W. Przebieg współczynnika tarcia w tej parze i w parze smarowanej olejem 5W40 i z płytką z powłoką a-C:H:W charakteryzował się najbardziej stabilnym przebiegiem (na końcu próby współczynnik tarcia wynosił około 0,08) w porównaniu do pozostałych badanych skojarzeń ciernych. W pozostałych parach ciernych po obniżeniu się oporów tarcia do lokalnego minimum obserwuje się tendencję powolnego wzrostu oporów tarcia i na końcu współczynnik tarcia wyniósł około 0,1 (rys. 5.9c).

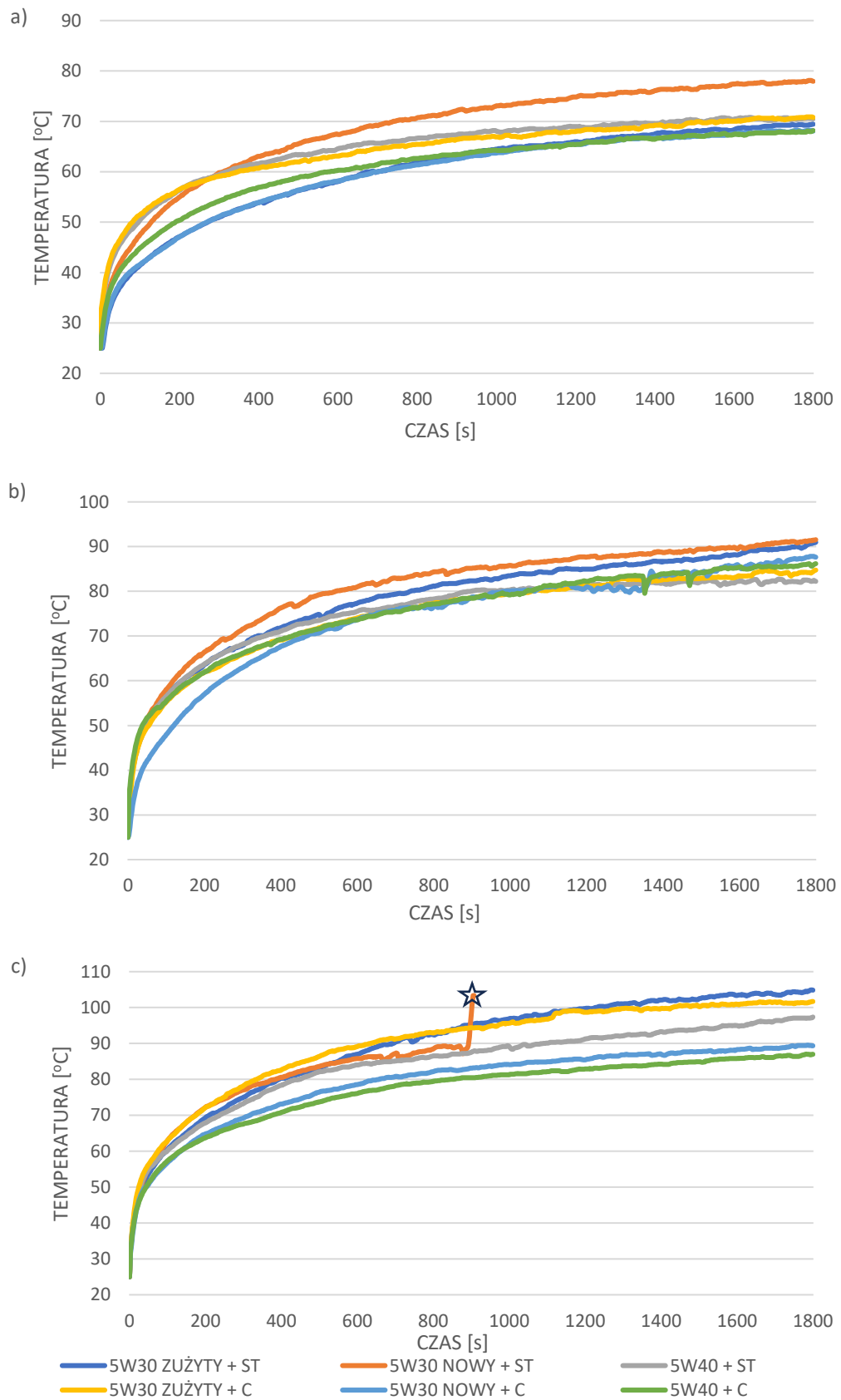
Podczas badań w styku konforemnym rejestrowano sumaryczne zużycie liniowe elementów pary ciernej próbki pierścieniowej i płytki zaworowej. Największe wartości zużycia liniowego odnotowano w skojarzeniu cierne smarowanym olejem silnikowym 5W30 nowym i z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo (komercyjną), przy sile nacisku 1800 N zużycie liniowe wyniosło 13,3 μm , przy 2400 N wyniosło 24,9 μm i przy sile 3000 N - 28,5 μm . Porównując to skojarzenie cierne do pary ciernej z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W i smarowanej tym samym olejem silnikowym 5W30 nowym, zużycie liniowe jest większe w przypadku pary z płytką utwardzoną powierzchniowo. Zużycie pary ciernej z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W wyniosło odpowiednio 7,3 μm przy sile 1800 N, 24,6 μm przy sile 2400 N oraz 27,8 μm przy sile 3000 N (rys. 5.10). W badaniu przy sile nacisku 1800 N najmniejszą wartość



Rys. 5.10. Sumaryczne zużycie liniowe skojarzeń ciernych ze stykiem niekonforemnym, smarowanych olejami silnikowymi 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40 w funkcji siły nacisku: a) 1800 N, b) 2400 N, c) 3000 N; (ST- z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo, C- z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W, * - zatarcie)

sumarycznego zużycia liniowego elementów pary cierniej 5,8 μm zarejestrowano dla pary cierniej smarowanej olejem 5W30 zużytym i z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo, przy sile nacisku 2400 N zużycie wyniosło 9,1 μm w skojarzeniu ciernym smarowanym olejem 5W30 nowym i również z płytką utwardzoną powierzchniowo, natomiast przy sile 3000 N zużycie liniowe w parze cierniej smarowanej olejem 5W30 zużytym i płytce zaworowej z powłoką a-C:H:W wyniosło 11,3 μm (rys. 5.10). Stosowanie powłoki a-C:H:W powoduje zmniejszenie zużycia liniowego, ale wyjątkiem jest para cierna smarowana olejem silnikowym 5W40 i z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W przy sile nacisku 2400 N. W tej parze wartość sumarycznego zużycia liniowego wynosi 13,4 μm i jest o 4,3 μm większa niż w parze cierniej z tym olejem i z płytką utwardzoną powierzchniowo (zużycie wyniosło 9,1 μm).

W procesach zużycia istotnym czynnikiem kształtującym procesy tarcia jest temperatura w obszarze styku pary cierniej i jej śmiana w czasie. Podczas badań przy sile nacisku 1800 N, najszybszy początkowy wzrost temperatury odnotowano w obszarze styku w parach ciernych smarowanych olejem silnikowym 5W40 i z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo oraz w parze smarowanej olejem silnikowym 5W30 zużytym i z płytką zaworową z powłoką węglową. Oba te skojarzenia ciernie charakteryzują się porównywalnym trendem zmian w czasie trwania próby zużycia i na zakończenie prób temperatura w obszarze styku wyniosła 70,8 °C. Jednak najwyższą



Rys. 5.11. Temperatura w obszarze tarcia w styku niekonforemnym smarowanym olejami silnikowymi 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40 w funkcji czasu, w naciskach: a) 1800 N, b) 2400 N, c) 3000 N; (ST- z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo, C- z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W, * - zatarcie)

temperaturę 77,9 °C zmierzono w skojarzeniu smarowanym olejem silnikowym 5W30 nowym i z płytką utwardzoną powierzchniowo. W porównaniu do najniższej wartości, 68 °C, którą odnotowano w obszarze styku w skojarzeniu ciernym smarowanym olejem silnikowym nowym 5W30 i z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W, różnica wynosi 9,9 °C (rys. 5.11a). Temperatura w obszarze tarcia pozostałych skojarzeń ciernych zawierała się pomiędzy 68,1 °C a 70,8 °C (rys. 5.11a).

W przypadku badań przy sile nacisku 2400 N, zakres temperatur w obszarze styku pary ciernej znacznie wzrósł względem badań przy mniejszej sile nacisku. W większości par ciernych w początkowej fazie badań obserwuje się zbliżony trend przyrostu temperatury w czasie trwania próby, i tylko w skojarzeniu ciernym smarowanym olejem silnikowym 5W30 nowym i z płytką zaworową z powłoką węglową, w początkowej fazie próby przyrost temperatury był znacznie wolniejszy. (rys. 5.11b). Najwyższa wartość temperatury 87,8 °C, podobnie jak w badaniach przy sile 1800 N, została zarejestrowana w parze ciernej smarowanej olejem 5W30 nowym i z płytką utwardzoną powierzchniowo. Nieznacznie niższą temperaturę 87,7 °C zmierzono w obszarze styku pary ciernej smarowanej olejem silnikowym 5W30 zużyтым i tą samą płytką, następnie w parze ciernej smarowanej olejem 5W30 nowym i z płytką z powłoką a-C:H:W, gdzie wartość wyniosła 86,4 °C. Najniższą wartość temperatury 84,5 °C odnotowano w obszarze styku w parze ciernej smarowanej olejem silnikowym nowym 5W30 i z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo (rys. 5.11b). Podczas rejestrowanych przebiegów temperatur w obszarze styku przy sile nacisku 3000 N, przyrost temperatury na początku badań był w zasadzie zbliżony dla każdej pary ciernej (rys. 5.11c). Najwyższą temperaturę w obszarze tarcia w tym cyklu badań 101,5 °C zmierzono w parze ciernej smarowanej olejem silnikowym 5W30 zużyтым i z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo. W momencie zatarcia pary ciernej smarowanej olejem 5W30 nowym i z płytką zaworową komercyjną, wartość temperatury w obszarze styku wynosiła 100,9 °C, jednak przed zatarciem było to około 89 °C. Skojarzenie cierne smarowane olejem silnikowym 5W30 zużyтым i z płytką zaworową z powłoką węglową a-C:H:W na koniec badań osiągnęło wartość temperatury w obszarze tarcia 97,1 °C. Trzy najniższe wartości temperatury, kolejno 89,2 °C, 87 °C i 86,2 °C zostały zarejestrowane dla skojarzenia ciernego smarowanego olejem silnikowym 5W40 i z płytką utwardzoną powierzchniowo, pary ciernej smarowanej olejem 5W30 nowym i z płytką z powłoką a-C:H:W oraz pary ciernej smarowanej olejem 5W40 i z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W (rys. 5.11c).

Tabela 5.7. Siła tarcia, zużycie liniowe i temperatura w obszarze tarcia w styku liniowym

Skojarzenie pary ciernej						
Siła nacisku [N]	Płytki zaworowe utwardzone powierzchniowo			Płytki zaworowe z powłoką węglową a-C:H:W		
	Stan oleju					
	5W30 zużyty	5W30 nowy	5W40	5W30 zużyty	5W30 nowy	5W40
Siła tarcia [N]						
1800	129,7	185,9	157,2	167,2	157,3	178,2
2400	259,9	257,2	201,4	181,8	229,3	175,8
3000	295,1	258,4*	284,9	295,2	238,7	255,3
Zużycie liniowe [μm]						
1800	5,8	13,3	12,6	6,11	7,3	8,2
2400	24,7	24,9	9,1	10,2	24,6	13,4
3000	16,6	28,5*	19,4	11,3	27,8	13,9
Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]						
1800	68,1	77,9	70,8	70,8	68,9	68
2400	87,7	87,8	84,5	85,8	86,4	86
3000	101,5	100,9*	89,2	97,1	87	86,2

Zarejestrowane wielkości pomiarowe podczas badań zużycia prowadzonych na testerze tribologicznym T-05 typu rolka–kłosek w styku niekonforemnym zestawiono w formie tabelarycznej (siłę tarcia, zużycie liniowe i temperaturę) (tab. 5.7). Analiza średniej siły tarcia, obliczonej na podstawie końcowych punktów pomiarowych zgodnie z przyjętą metodyką badawczą, wskazuje na zróżnicowanie uzyskanych wyników w zakresie od 129,7 N dla siły nacisku 1800 N, w parze ciernej smarowanej olejem silnikowym 5W30 zużytym i z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo do 295,1 N w tej samej parze ciernej przy sile nacisku 3000 N (tab. 5.7). W większości badanych par ciernych, siła tarcia była mniejsza gdy stosowano powłokę węglową a-C:H:W. W badaniach sumarycznego zużycia liniowego, najmniejszą wartość 5,8 μm zarejestrowano w parze ciernej smarowanej olejem silnikowym 5W30 zużytym i z płytką utwardzoną powierzchniowo, przy sile nacisku 1800 N. Największe zużycie 28,5 μm w skojarzeniu ciernym smarowanym olejem 5W30 nowym i z płytką utwardzoną powierzchniowo (o 23 μm więcej w porównaniu do poprzedniego skojarzenia ciernego). Zakres temperatur w obszarze tarcia podczas badań wahał się pomiędzy 68,1 $^{\circ}\text{C}$ (para cierna smarowana olejem silnikowym 5W30 zużytym i z płytką utwardzoną

powierzchniowo, przy sile nacisku 1800 N) a 101,5 °C (różnica 33,4 °C) w przypadku tej samej pary ciernej przy sile nacisku 3000 N. W badanych skojarzeniach ciernych w styku niekonforemnym można zauważyć, że w większości skojarzeń obserwuje się wzrost wartości mierzonych wielkości wraz ze wzrostem siły nacisku, jednak zależność ta nie ma charakteru w pełni liniowego (tab. 5.7).

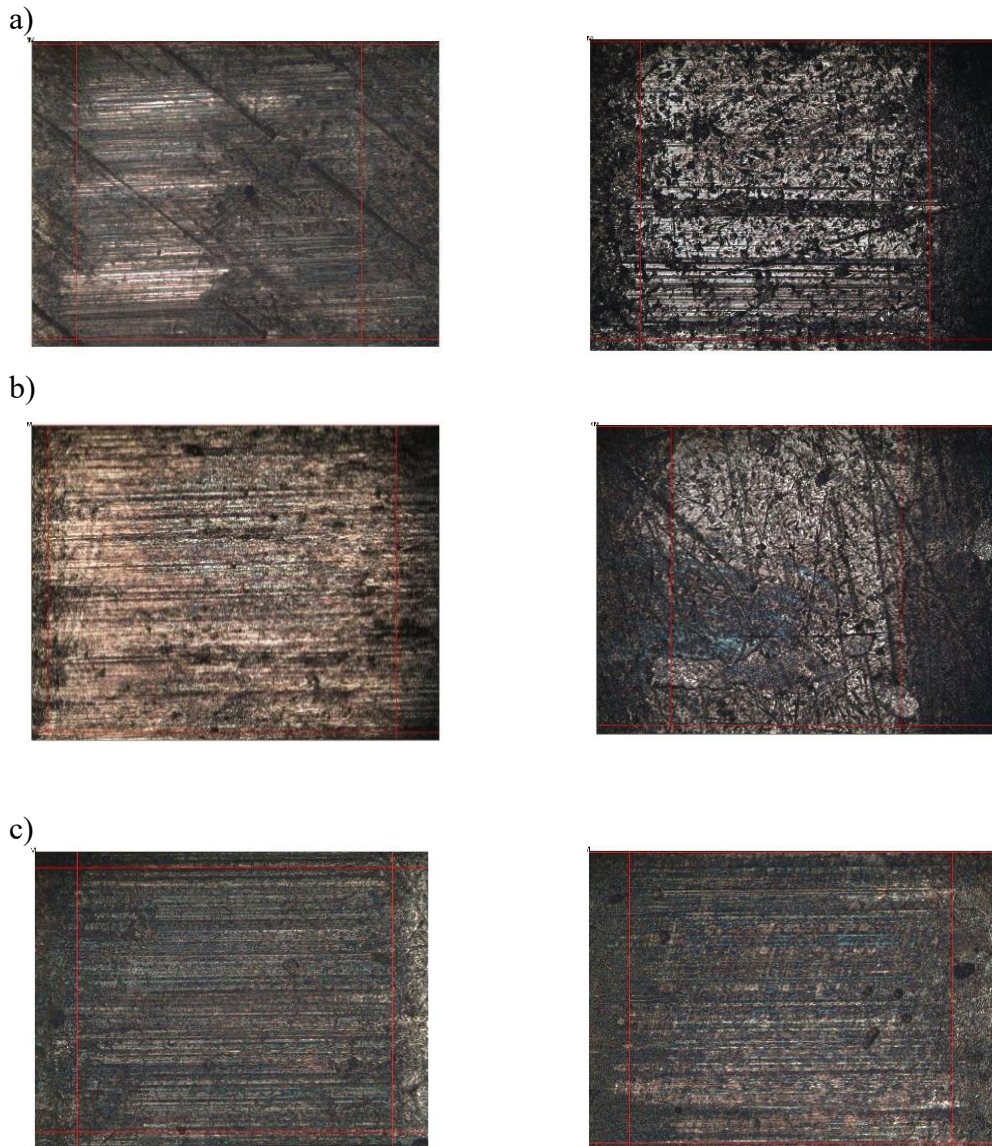
5.2.3. Stan warstwy powierzchniowej płytek zaworowych po badaniach w styku liniowym

Po zakończeniu prób zużycia w styku liniowym, warstwy powierzchniowe płytek zaworowych zostały poddane obserwacji mikroskopowej celem pomiaru szerokości śladów zużycia i opisu zmian w strukturze warstwy powierzchniowej. Ślady wytarcia na płytkach zaworowych z utwardzoną warstwą powierzchniową i płytkach zaworowych pokrytych powłoką z węgla amorficznego, przy najwyższej sile nacisku (3000 N) (rys. 5.12) wykazują podobne ślady zużycia dla wszystkich badanych olejów. Natomiast znaczny wpływ na geometrię powstałego śladu zużycia ma rodzaj ukształtowanej warstwy powierzchniowej płytki zaworowej. Największą szerokość śladu zużycia przy smarowaniu olejem nowym 5W30 odnotowano na poziomie 799 μm dla płytki zaworowej utwardzonej powierzchniowo oraz 680 μm dla płytki zaworowej z powłoką a-C:H:W. Wskazuje to na mniejsze zużycie powierzchni w przypadku zastosowania powłoki węglowej. Płytki z warstwą powierzchniową utwardzoną powierzchniowo mają liczniejsze i bardziej widoczne rysy oraz wyraźniejsze granice przejścia między śladem wytarcia a powierzchnią technologicznie ukształtowaną. Na płytkach zaworowych z powłoką z amorficznym węglem granice śladów wytarcia są mniej zauważalne. Najbardziej zauważalną różnicą jest liczba rys występujących w obrębie śladu zużycia i w przypadku płytek zaworowych utwardzonych powierzchniowo ich liczebność jest wyraźnie większa niż w przypadku płytek z powłoką a-C:H:W. Ślady zużycia płytek zaworowych pracujących w parach ciernych smarowanych olejem silnikowym 5W40 wskazują, że płytki zaworowe utwardzone powierzchniowo charakteryzowały się większą intensywnością zużycia niż płytki zaworowe pokryte powłoką a-C:H:W.

Wraz ze wzrostem siły nacisku następowało zwiększenie obszaru śladu zużycia, szczególnie widoczne dla płytek zaworowych utwardzonych powierzchniowo. Największą intensywność zużycia zaobserwowano przy obciążeniu 3000 N. W przypadku płytek zaworowych z powłoką a-C:H:W ślady zużycia były mniej rozwinięte, a przy największym obciążeniu zaobserwowano wygładzenie powierzchni

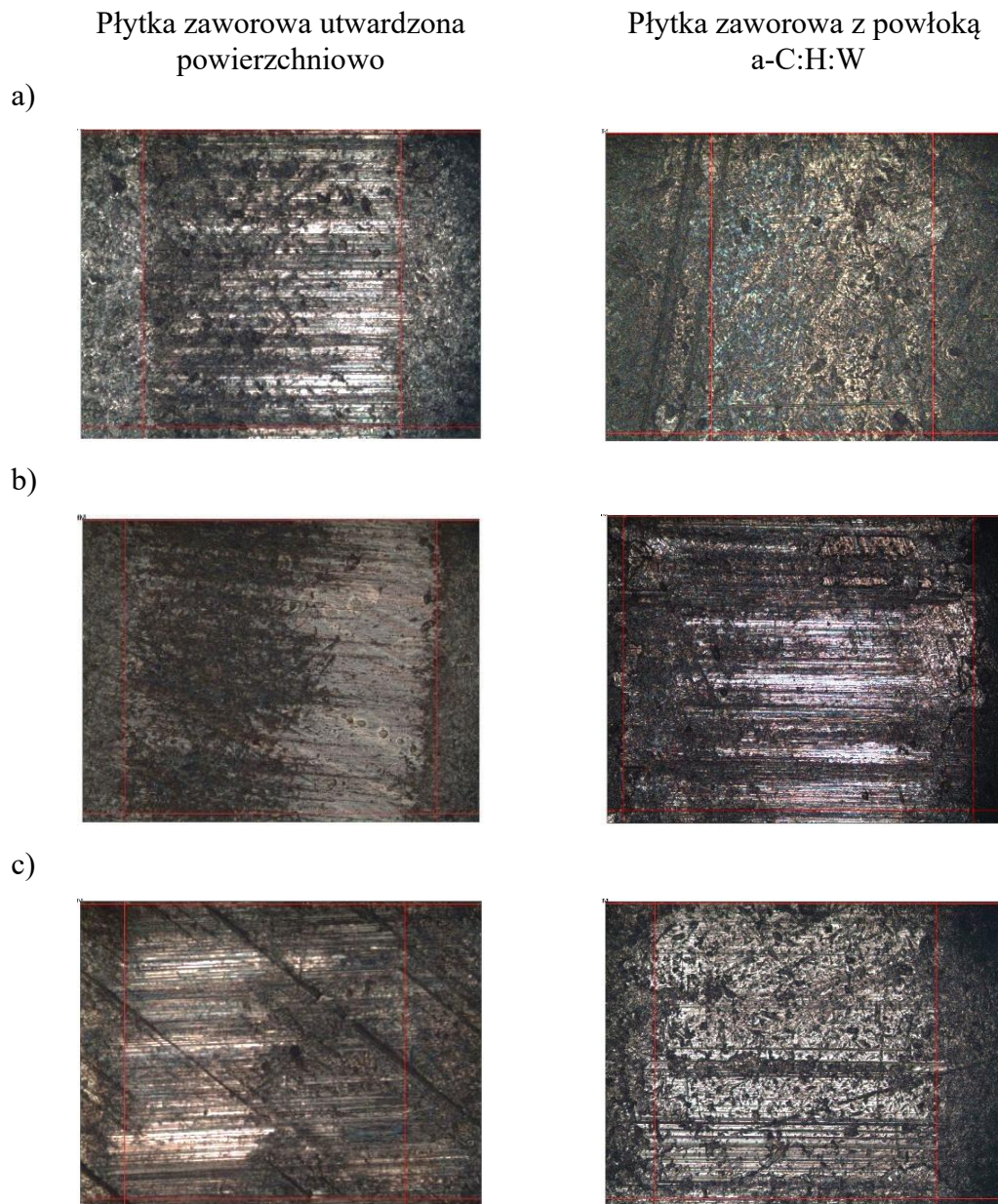
Płytki zaworowa utwardzona powierzchniowo

Płytki zaworowa z powłoką a-C:H:W



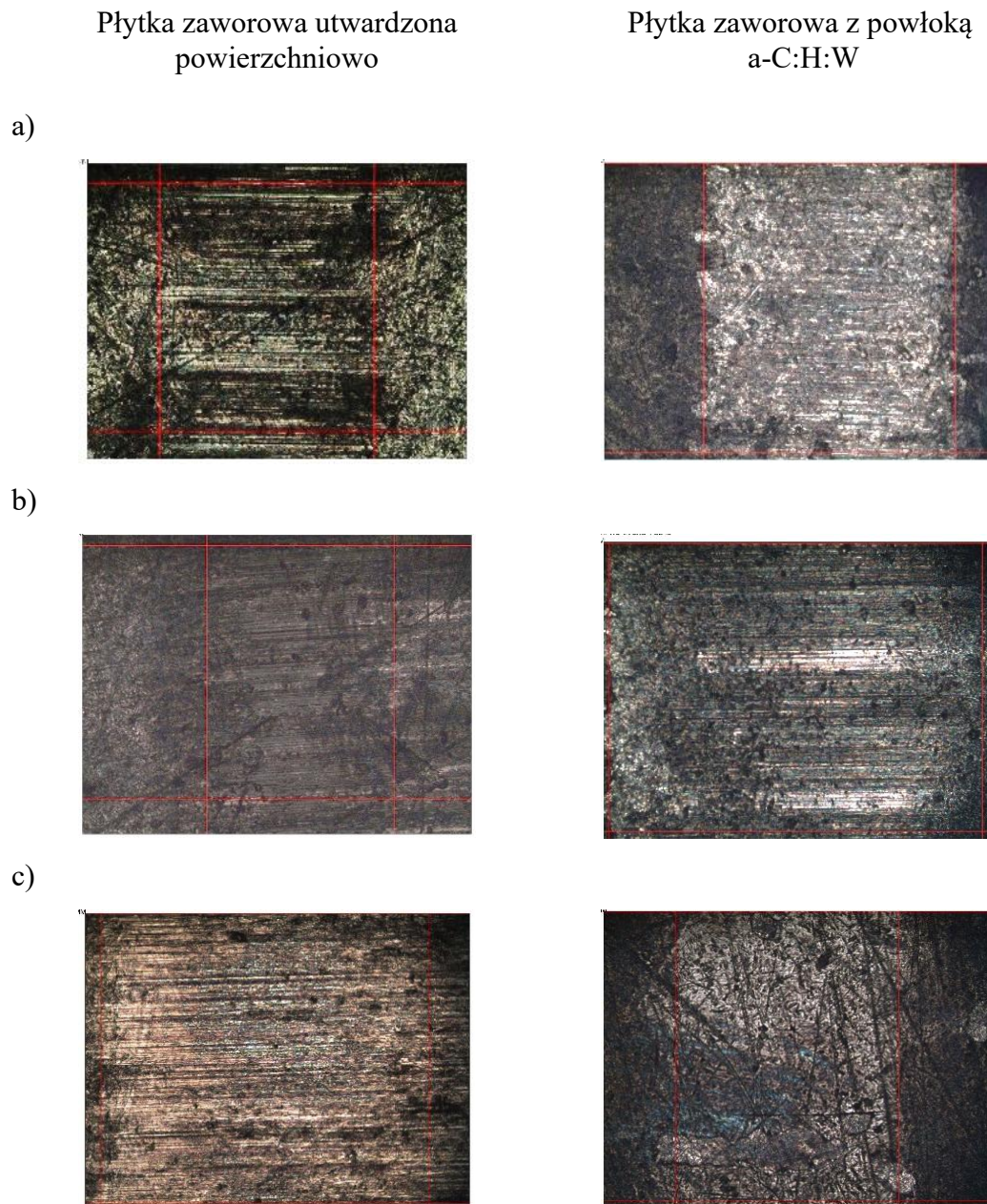
Rysunek 5.12. Ślady wytarcia płytek zaworowych po badaniach zużycia w styku liniowym przy sile nacisku 3000 N, w zależności od oleju smarującego obszar tarcia: a) 5W40, b) 5W30 nowy, c) 5W30 zużyty

w obszarze tarcia, co może świadczyć o korzystnym oddziaływaniu powłoki na przebieg procesu zużywania (rys. 5.13). Mniejsza szerokość śladów zużycia oraz mniej rozwinięty charakter uszkodzeń powierzchni wskazują na wyższą odporność tribologiczną elementów pokrytych powłoką węglową. Efekt ten był szczególnie widoczny przy największym obciążeniu, kiedy różnice pomiędzy badanymi wariantami warstw powierzchniowych były najbardziej wyraźne.



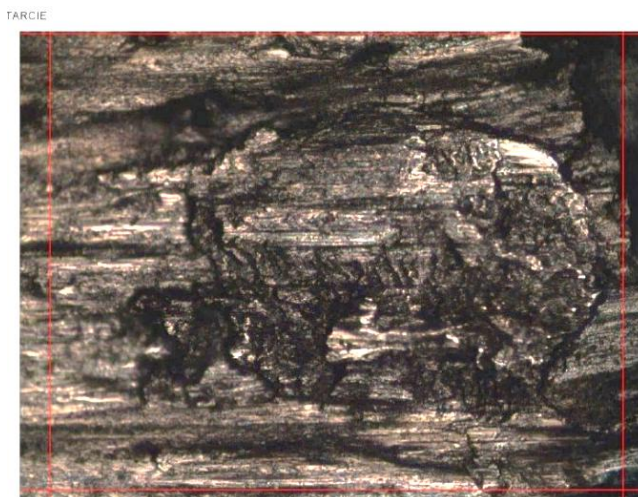
Rysunek 5.13. Ślady wytarcia płytek zaworowych po badaniach zużycia w styku liniowym przy smarowaniu olejem 5W40 w sile nacisku: a) 1800 N, b) 2400 N, c) 3000 N

Zdjęcia mikroskopowe płytek zaworowych badanych w parach ciernych smarowanych nieeksploatowanym w pojeździe samochodowym olejem silnikowym 5W30 nowym wykazały, że rodzaj zużycia płytek zaworowych utwardzonych powierzchniowo, w niemal pełnym zakresie badanych sił nacisku pozostaje bardzo podobny. Jedynie przy najwyższej sile nacisku występują znacznie większe i liczniejsze poprzeczne rysy co wykazuje na intensywniejsze zmiany w warstwie powierzchniowej w porównaniu do badań przy sile 1800 N i 2400 N (rys. 5.14).



Rysunek 5.14. Ślady wytarcia płytek zaworowych po badaniach zużycia w styku liniowym przy smarowaniu olejem silnikowym nowym 5W30 w sile nacisku: a) 1800 N, b) 2400 N, c) 3000 N

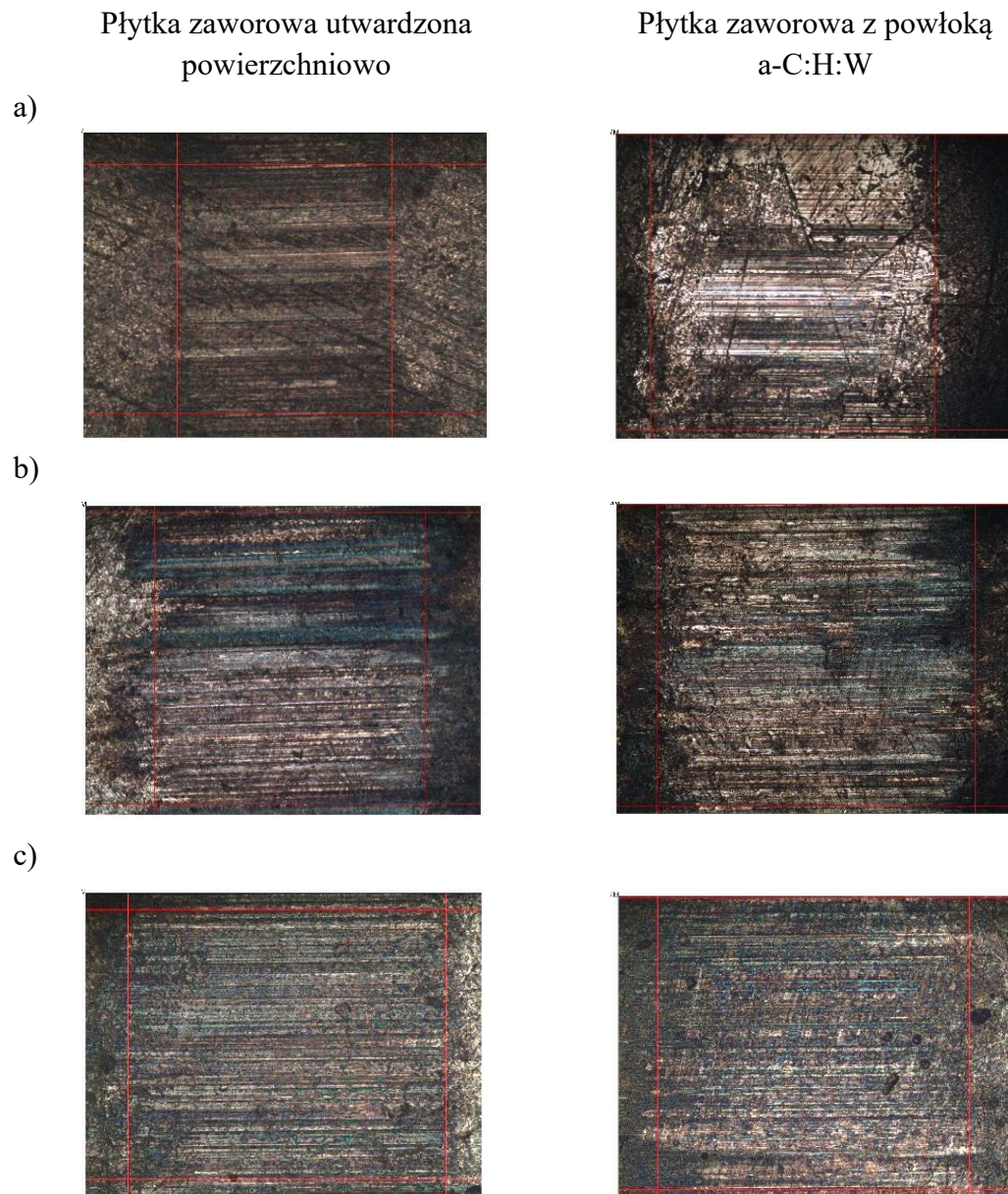
Płytki zaworowe z powłoką a-C:H:W charakteryzują ślady zużycia o mniejszej ilości rys (rys. 5.14). Widoczne podczas badania przy sile nacisku 2400 N białe wytarcie wskazuje na prawdopodobnie wytarcie materiału powłoki. Ślady zużycia przy sile nacisku 3000 N są mniejsze dla płytek z powłoką węglową i obserwuje się znacznie mniejszą ilość rys poprzecznych względem płytki zaworowej utwardzonej powierzchniowo (rys. 5.14). Szerokość śladu zużycia była wyraźnie mniejsza (o około 15–20%) w przypadku płytki zaworowej z powłoką a-C:H:W.



Rysunek 5.15. Ślady wytarcia płytki zaworowej po badaniach zużycia w styku liniowym dla oleju nowego 5W30, próba zakończona zatarciem

Podczas badań zużycia liniowego par ciernych płytek zaworowych z utwardzoną powierzchnią z użyciem oleju silnikowego 5W30 nowego przy próbie 3000 N doszło do zatarcia pary cierniej w 859 s trwania badania zużycia. Na zdjęciu widoczne jest przeniesienie materiału w śladzie wytarcia, głębokie wytarcia i rysy, znaczne naruszenie struktury powierzchni oraz ciemne ślady wtopień, wskazujące najprawdopodobniej na znaczne temperatury pracy w obszarze tarcia (rys. 5.15). Szerokość śladu zużycia w badaniu zakończonym zatarciem pary cierniej wyniosła 769 μm i jest podobna do szerokości śladu zużycia na płycie zaworowej po pełnym teście. Zatarcie pary cierniej nie wystąpiło w kompozycji z płytkami zaworowymi z powłoką a-C:H:W potwierdzając tezę, iż płytka z powłoką stwarza lepsze warunki tarcia pracy cierniej ze stykiem liniowym, gdy występuje przerwanie filmu smarnego.

W badaniach w których do smarowania obszaru tarcia zastosowano olej silnikowy 5W30 zużyty po eksploatacji w pojeździe samochodowym zauważono największe różnice w śladach wytarcia względem par ciernych z innymi olejami (rys. 5.16). Zarówno na płycie zaworowej utwardzonej powierzchniowo jak i płycie zaworowej z powłoką z amorficznego węgla możemy zaobserwować znacznie liczniejsze rysy poprzeczne niż w przypadku smarowania olejami nowymi. Najistotniejsza różnica występuje przy sile 1800 N, gdzie większe zużycie zaobserwowano na płycie z powłoką a-C:H:W niż na płycie zaworowej utwardzonej powierzchniowo. Natomiast ślady wytarcia przy siłach nacisku 2400 N oraz 3000 N posiadają zbliżoną szerokość śladu wytarcia i podobny charakter zmian i rys (rys. 5.16).



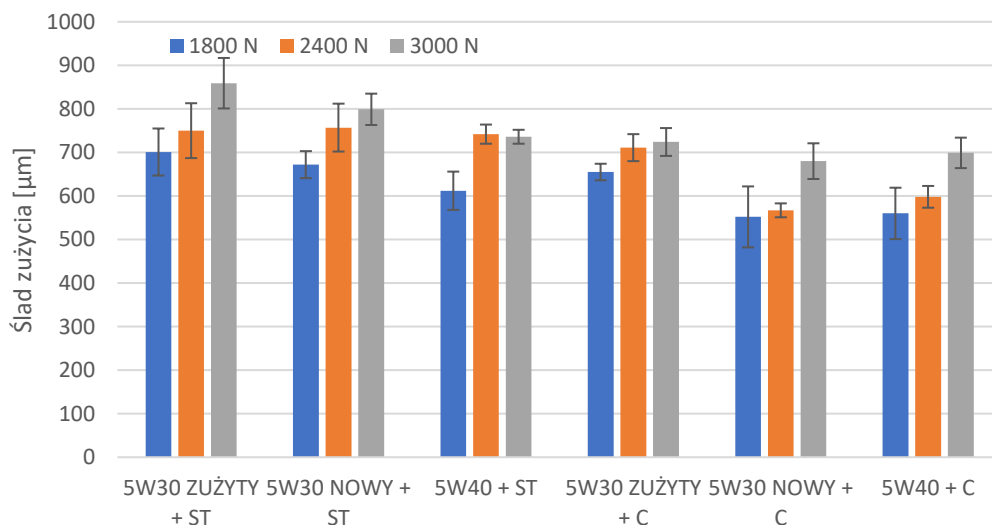
Rysunek 5.16. Ślady wytarcia płytek zaworowych po badaniach zużycia w styku liniowym przy smarowaniu olejem użytym 5W30 w sile nacisku: a) 1800 N, b) 2400 N, c) 3000 N

Wyniki badań wskazują na nieproporcjonalny wzrost szerokości śladu wytarcia wraz ze wzrostem sił nacisku dla większości badanych par ciernych ze stykiem liniowym. Największe wartości zużycia zanotowano dla płytek zaworowych stosowanych w parach smarowanych olejem 5W30 po eksploatacji w pojeździe samochodowym, gdzie przy sile nacisku 1800 N zanotowano średni ślad wytarcia wynoszący 701 μm – jest to o 39 μm większy wynik niż w przypadku tego samego oleju nieeksploatowanego, oraz 89 μm więcej niż w przypadku oleju 5W40 nowego (tab. 5.8). Przy sile nacisku w obszarze styku 2400 N, najszerszy ślad zużycia wystąpił na płytkach zaworowych smarowanych w parze olejem 5W30 nowym i wynosił on 757 μm , co o 7 μm jest większy niż ślad wytarcia przy

Tabela 5.8. Ślad zużycia na płytkach zaworowych w badaniach zużycia w styku liniowym [μm]

Skojarzenie cierne						
Siła nacisku [N]	Płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo			Płytką zaworową z powłoką a- C:H:W		
	Rodzaj użytego oleju					
	5W30 zużyty	5W30 nowy	5W40	5W30 zużyty	5W30 nowy	5W40
1800	701	672	612	655	552	560
2400	750	757	742	711	567	598
3000	859	799	736	724	680	699

smarowaniu olejem zużytym i o $15 \mu\text{m}$ większy niż przy smarowaniu olejem silnikowym 5W40. W porównaniu do śladu wytarcia przy najmniejszej sile nacisku jest większy o $95 \mu\text{m}$. Przy największej sile nacisku 3000 N, najszerszy ślad wytarcia zmierzono na płytce zaworowej komercyjnej smarowanej w parze cierniej olejem silnikowym zużytym 5W30, gdzie wartość śladu wytarcia osiągnęła $859 \mu\text{m}$.



Rysunek 5.17. Szerokość śladu zużycia płytek zaworowych w parach ciernych smarowanych olejami silnikowymi 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40, przy naciskach 1800 N, 2400 N, 3000 N; (ST- z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo, C- z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W)

Na płytce zaworowej komercyjnej utwardzonej powierzchniowo przy smarowaniu olejem 5W30 nowym wartość śladu wyniosła $799 \mu\text{m}$ o $60 \mu\text{m}$ mniej niż w parze cierniej z olejem silnikowym 5W30 zużytym. Przy smarowaniu olejem 5W40 ślad wytarcia wyniósł $736 \mu\text{m}$ o $123 \mu\text{m}$ mniej niż w przypadku oleju 5W30 zużytego oraz $63 \mu\text{m}$ mniej niż przy smarowaniu olejem 5W30 nowym. Pomiar zużycia płytek zaworowych utwardzonych powierzchniowo wykazały schemat zmian, większy ślad

zużycia przy wzroście nacisku. Najmniejsze ślady zużycia obserwowano na płycie przy smarowaniu olejem 5W40, a największe przy smarowaniu olejem po eksploatacji 5W30 – średnio o około 70 μm (około 13%). Jednak w przypadku pary ciernej smarowanej olejem 5W40 ślady zużycia wyznaczone przy sile nacisku 2400 N i 3000 N są zbliżone (rys. 5.17).

W badaniach płytek zaworowych z powłoką z amorficznego węgla a-C:H:W najszersze ślady wytarcia zanotowano podczas smarowania obszaru tarcia olejem silnikowym 5W30 zużytym po eksploatacji – kolejno 655 μm przy sile nacisku 1800 N, 711 μm przy 2400 N oraz 724 μm przy 3000 N (tab. 5.8). Natomiast najmniejsze ślady wytarcia płytki zaworowej z powłoką a-C:H:W zarejestrowano przy smarowaniu olejem silnikowym 5W30 nowym. Smarowanie olejem silnikowym 5W40 spowodowało zużycie powłoki kolejno 560 μm przy sile nacisku wynoszącej 1800 N, 598 μm przy sile nacisku 2400 N i 699 przy sile nacisku 3000 N. Największe rozbieżności w wielkości śladu wytarcia przy najmniejszej i największej sile nacisku przy smarowaniu obszaru tarcia olejem silnikowym 5W40 oraz nowym olejem silnikowym 5W30 wyniosły około 130 μm (24%). Różnica zużycia płytki przy smarowaniu pary ciernej zużytym olejem silnikowym 5W30 z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W pomiędzy najmniejszą a największą siłą nacisku (1800 N a 3000 N) wynosiła 69 μm (ok 13%), podobnie jak dla płytek z powierzchnią utwardzoną powierzchniowo, w tym przypadku również ślad wytarcia zwiększał się wraz ze wzrostem siły nacisku podczas badań (rys. 5.17). Zużycie płytki zaworowej z powłoką z amorficznego węgla względem warstwy powierzchniowej płytki zaworowej komercyjnej utwardzonej powierzchniowo jest mniejsze. Największa różnica została zanotowana dla pary ciernej smarowanej olejem silnikowym 5W30 zużytym, gdzie różnica wyniosła 135 μm (859 μm szerokości śladu wytarcia na płycie komercyjnej utwardzonej powierzchniowo i 724 μm na płycie zaworowej z ukształtowaną powłoką z amorficznego węgla). Potwierdza to tezę, zakładającą stworzenie lepszych warunków tarcia dla płytek zaworowych z amorficznego węgla.

5.2.4. Chropowatość warstw powierzchniowych elementów par ciernych po badaniach w styku niekonforemnym

Po zakończeniu badań zużycia w styku niekonforemnym oraz pomiarów śladu zużycia, przeprowadzono pomiary chropowatości powierzchni próbek pierścieniowych oraz przeciwpróbek z płytek zaworowych. W skojarzeniu ciernym smarowanym olejem silnikowym 5W30 zużytym stosującym próbkę pierścieniową ulepszaną cieplnie i płytki

Tabela 5.9. Chropowatość powierzchni elementów par ciernych po badaniach w styku niekonforemnym przy sile nacisku 1800 N

Skojarzenie pary ciekiej		Próbka pierścieniowa ulepszana cieplnie – płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo				Próbka pierścieniowa ulepszana cieplnie – płytką zaworową z powłoką a-C:H:W			
Elementy pary		Pierścień		Płytką		Pierścień		Płytką	
Próbka przed badaniami	Parametr	Wartość [μm]		Wartość [μm]		Wartość [μm]		Wartość [μm]	
	Ra	0,21		0,29		0,21		0,31	
	Rz	1,71		1,79		1,71		2,62	
	Rq	0,26		0,35		0,26		0,41	
	RSm	33		45,2		33		48,2	
Olej	Parametr	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]
5W30 zużyty	Ra	0,48	128,5	0,37	27,5	0,38	80,9	0,44	41,9
	Rz	3,96	131,5	2,28	27,3	2,87	67,8	2,79	6,4
	Rq	0,64	146,1	0,47	34,2	0,49	88,4	0,56	36,5
	RSm	67,7	104,5	95,2	110,6	52,3	58,4	71,2	47,7
5W30 nowy	Ra	0,26	23,8	0,18	-37,9	0,31	47,6	0,40	29
	Rz	1,73	1,1	1,46	-18,4	2,48	45	2,98	13,7
	Rq	0,34	30,7	0,23	-34,2	0,41	57,6	0,52	26,8
	RSm	166	401,5	52,2	15,4	82,9	151,2	70,1	45,4
5W40	Ra	0,21	0,1	0,26	-10,3	0,27	28,5	0,70	125,9
	Rz	1,81	5,8	2,23	24,5	1,96	14,6	3,98	51,9
	Rq	0,27	3,8	0,35	0,1	0,34	30,7	0,86	109,7
	RSm	59,6	80	39,4	-12,8	118	257,5	122	153,1

zaworowe utwardzone powierzchniowo przy sile nacisku 1800 N, wskazywano istotne zmiany chropowatości powierzchni próbki pierścieniowej stalowej ulepszonej cieplnie. Parametry chropowatości powierzchni próbki pierścieniowej osiągnęły kolejno następujące wartości: Ra = 0,48 μm (wzrost o 128 % w porównaniu do próbki nowej), Rz = 3,96 μm (wzrost o 131%), Rq = 0,64 μm (o 146 % więcej) i RSm = 67 % (więcej o 103 %) (tab. 5.9). Płytki zaworowe utwardzone powierzchniowo w tym skojarzeniu ciernym również wykazały zwiększone wartości parametrów chropowatości powierzchni po badaniach w styku niekonforemnym, parametr Ra = 0,37 μm (wzrost o 27 %), Rz = 2,28 μm (o 27 %), Rq = 0,47 μm (o 34 %) i RSm = 95,2 μm (o 111 %) (tab. 5.9). Smarowanie obszaru tarcia olejem 5W30 nowym spowodowało znacznie mniejsze zmiany w strukturze geometrycznej warstwy powierzchniowej próbki pierścieniowej. Mierzone parametry Ra, Rz, Rq i RSm wyniosły kolejno 0,26, 1,73, 0,34, 166 μm , co odpowiada wzrostom procentowym o 23, 1, 31 i 401 % (tab. 5.9). Jedynie zmiana parametru RSm w tych warunkach smarowania była prawie czterokrotnie wyższa niż przy smarowaniu olejem silnikowym 5W30 zużytym. Pomiar chropowatości powierzchni płytek zaworowych wykazały zmniejszenie parametrów chropowatości

powierzchni po próbach zużycia $R_a = 0,18 \mu\text{m}$ (- 38%), $R_z = 1,46 \mu\text{m}$ (- 18 %), $R_q = 0,23 \mu\text{m}$ (- 34%).

Wartości parametrów chropowatości powierzchni nowych próbek pierścieniowych i po próbach zużycia, w parze cierniej smarowanej olejem silnikowym 5W40, dla parametrów R_a , R_z i R_q były nieznacznie wyższe od 0,1 do 5,8 %, wyjątkiem był parametr R_{Sm} , który zwiększył się o 80 %. Wartości parametrów chropowatości powierzchni płytek zaworowych w tych warunkach smarowania wyniosły kolejno: $R_a = 0,26 \mu\text{m}$ (zmniejszenie o 10 %), $R_z = 2,23 \mu\text{m}$ (wzrost o 24 %), $R_q = 0,35 \mu\text{m}$ (nie zmienił wartości), natomiast R_{Sm} zmniejszył o 13 %, i wyniósł $39,4 \mu\text{m}$ (tab. 5.9).

Zastosowanie w tych parach ciernych płytki zaworowej z powłoką węglową a-C:H:W spowodowało znaczne różnice w strukturze geometrycznej warstw powierzchniowych w stosunku do skojarzenia z płytkami zaworowymi utwardzonymi powierzchniowo. Pomiarzy chropowatości powierzchni elementów skojarzeń ciernych w parze cierniej smarowanej olejem silnikowym 5W30 zużytym wykazały znacznie mniejsze zmiany chropowatości powierzchni próbki pierścieniowej: $R_a = 0,38 \mu\text{m}$, $R_z = 2,87 \mu\text{m}$, $R_q = 0,49 \mu\text{m}$, $R_{Sm} = 52,3 \mu\text{m}$, co stanowiło zwiększenie tych parametrów względem nowych próbek pierścieniowych odpowiednio o 81, 68, 88, 58 % (tab. 5.9). Płytki zaworowe z powłoką węglową również odnotowały wzrost parametrów chropowatości powierzchni i tak parametr $R_a = 0,44 \mu\text{m}$ i wzrósł o 42 %, $R_z = 2,79 \mu\text{m}$ i wzrósł o 6 %, $R_q = 0,56 \mu\text{m}$ i wzrósł o 36 %, a $R_{Sm} = 71,2 \mu\text{m}$ i był większy o 48 % względem parametru nowej płytki zaworowej z powłoką a-C:H:W. Chropowatości powierzchni próbek pierścieniowych i płytek zaworowych z powłoką a-C:H:W w parze cierniej smarowanej olejem 5W30 nowym, wykazały wzrost mierzonych parametrów R_a , R_z , R_q i R_{Sm} względem nowych próbek pierścieniowych i płytek z powłoką węglową. Przy czym chropowatość powierzchni próbek pierścieniowych ma podobny trend zmian jak w parze cierniej z płytkami utwardzonymi powierzchniowo: $R_a = 0,31 \mu\text{m}$, $R_z = 2,48 \mu\text{m}$, $R_q = 0,41 \mu\text{m}$ i $R_{Sm} = 82,9 \mu\text{m}$ (kolejno wzrost o 48, 45, 57, 151 %). Płytki zaworowe z powłoką węglową natomiast również wykazały wzrost względem parametrów chropowatości powierzchni nowych płytek zaworowych z powłoką a-C:H:W osiągając kolejno dla R_a , R_z , R_q i R_{Sm} wartości 0,4, 2,98, 0,52 i $70,1 \mu\text{m}$ i stanowiąc odpowiednio wzrost o 29, 14, 27 i 45 % (chropowatości powierzchni płytek utwardzonych powierzchniowo w tych warunkach smarowania zmniejszyła się w stosunku do płytek nowych). Przy smarowaniu obszaru tarcia olejem silnikowym 5W40, parametry chropowatości powierzchni próbki pierścieniowej wzrosły R_a , R_z i R_q

były większe o 28, 15 i 31 % względem nowej próbki pierścieniowej, osiągając wartości: $R_a = 0,27 \mu\text{m}$, $R_z = 1,96 \mu\text{m}$ oraz $R_q = 0,34 \mu\text{m}$. Parametr $R_{Sm} = 118 \mu\text{m}$ próbki pierścieniowej wykazał największy wzrost o 257 %. Pomiar chropowatości powierzchni płytek zaworowych z powłoką a-C:H:W wykazały znaczne wzrosty i wyniosły odpowiednio 126 % parametr $R_a = 0,7 \mu\text{m}$, o 52 % parametr $R_z = 3,98 \mu\text{m}$, o 110 % parametr $R_q = 0,86 \mu\text{m}$ o 153 % parametr $R_{Sm} = 122 \mu\text{m}$ (tab. 5.9). Wyznaczone zmiany chropowatości powierzchni płytek zaworowych z powłoką a-C:H:W przy smarowaniu olejem silnikowym 5W40 są najwyższe w porównaniu tych przy smarowaniu obszaru tarcia w parach ciernych olejem silnikowym 5W30 (nowym i użytym).

Po zakończeniu badań zużycia w styku liniowym przy sile nacisku 2400 N w skojarzeniu ciernym próbka pierścieniowa ulepszana cieplnie i płytka zaworowa utwardzona powierzchniowo przy smarowanym olejem silnikowym 5W30 użytym, odnotowano istotny zwiększenie wartości parametrów chropowatości powierzchni próbki pierścieniowej względem nowych próbek. Parametry R_a , R_z , R_q oraz R_{Sm} osiągnęły odpowiednio wartości 0,56, 3,8, 0,71 oraz 87,2 μm , co stanowiło wzrost o 167, 122, 173 oraz 163 %. Największe zmiany odnotowano dla parametrów R_q oraz R_{Sm} . Płytki zaworowe utwardzone powierzchniowo wykazały natomiast zmniejszenie parametrów R_a , R_z oraz R_q do wartości odpowiednio 0,21, 1,43 i 0,26 μm , co odpowiadało spadkowi o 28, 20 i 26 %. Jedynie parametr $R_{Sm} = 67,9 \mu\text{m}$ wzrósł o 50 % względem nowej przeciwpróbki (tab. 5.10). Zastosowanie oleju silnikowego 5W30 nowego spowodowało mniejsze zmiany parametrów R_a oraz R_z próbki pierścieniowej względem oleju 5W30 użytego, natomiast parametr R_{Sm} osiągnął znacznie większą wartość. Parametry R_a , R_z , R_q oraz R_{Sm} wyniosły odpowiednio 0,40, 2,47, 0,57 oraz 258 μm , co odpowiadało wzrostowi o 90, 44, 119 oraz 679 %. Parametr R_{Sm} osiągnął najwyższą wartość spośród wszystkich analizowanych przypadków przy sile nacisku 2400 N. Płytki zaworowe utwardzone powierzchniowo wykazały zmniejszenie parametrów R_a , R_z oraz R_q odpowiednio o 31, 16 oraz 26 %, natomiast parametr $R_{Sm} = 61,2 \mu\text{m}$ był większy o 35 % względem nowej płytki zaworowej. W przypadku par z olejem silnikowym 5W40 odnotowano najmniejsze zmiany parametrów chropowatości powierzchni próbek pierścieniowych spośród wszystkich analizowanych olejów. Parametry $R_a = 0,18 \mu\text{m}$, $R_z = 1,35 \mu\text{m}$ oraz $R_q = 0,23 \mu\text{m}$ były mniejsze odpowiednio o 14, 21 oraz 12 % względem nowej próbki pierścieniowej, natomiast parametr $R_{Sm} = 76,2 \mu\text{m}$ wzrósł o 130 %. Wartości parametrów R_a , R_z oraz R_q były niższe niż przy smarowaniu olejem silnikowym 5W30 nowym i użytym. Płytki zaworowe utwardzone powierzchniowo

Tabela 5.10. Chropowatość powierzchni elementów par ciernych po badaniach w styku niekonforemnym przy sile nacisku 2400 N

Skojarzenie pary cierniej		Próbka pierścieniowa ulepszana cieplnie –płytką zaworowa utwardzona powierzchniowo				Próbka pierścieniowa ulepszana cieplnie –płytką zaworowa z powłoką a-C:H:W			
Elementy pary		Pierścień		Przeciwpróbka		Pierścień		Przeciwpróbka	
Próbka przed eksploatacją	Parametr	Wartość [μm]		Wartość [μm]		Wartość [μm]		Wartość [μm]	
	Ra	0,21		0,29		0,21		0,31	
	Rz	1,71		1,79		1,71		2,62	
	Rq	0,26		0,35		0,26		0,41	
	RSm	33		45,2		33		48,2	
Olej	Parametr	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]
5W30 zużyty	Ra	0,56	166,6	0,21	-27,5	0,44	109,5	0,28	-9
	Rz	3,80	122,2	1,43	-20,1	3,40	98,8	1,76	-32,8
	Rq	0,71	173	0,26	-25,7	0,57	119,2	0,35	-14,6
	RSm	87,2	163,4	67,9	50,2	93,2	182,4	60,4	25,3
5W30 nowy	Ra	0,40	90,4	0,20	-31	0,30	42,8	0,19	-38,7
	Rz	2,47	44,4	1,50	-16,2	2,62	53,2	1,27	-51,5
	Rq	0,57	119,2	0,26	-25,7	0,40	53,8	0,24	-41,4
	RSm	258	679,4	61,2	35,3	81,5	146,9	43	-10,7
5W40	Ra	0,18	-14,2	0,20	-31	0,35	66,6	0,36	16,1
	Rz	1,35	-21	1,55	-13,4	2,13	24,5	2,52	-3,8
	Rq	0,23	-11,5	0,25	-28,5	0,45	73	0,47	14,6
	RSm	76,2	130,2	69,5	53,7	148	348,4	80,2	66,3

również wykazały zmniejszenie parametrów Ra, Rz oraz Rq odpowiednio o 31, 13 oraz 29 %, natomiast parametr RSm = 69,5 μm zwiększył się o 54 % (tab. 5.10). Zastosowanie płytki zaworowej z powłoką a-C:H:W spowodowało odmienne zmiany parametrów chropowatości powierzchni względem skojarzeń z płytkami utwardzonymi powierzchniowo. W przypadku smarowania olejem silnikowym 5W30 zużytym próbki pierścieniowe osiągnęły wartości parametrów Ra = 0,44 μm , Rz = 3,40 μm , Rq = 0,57 μm oraz RSm = 93,2 μm , co odpowiadało wzrostowi o 110, 99, 119 i 182 %. W porównaniu do skojarzenia z płytką utwardzoną powierzchniowo wartości parametrów Ra, Rz oraz Rq były mniejsze, natomiast parametr RSm był większy. Płytki zaworowe z powłoką a-C:H:W wykazały mniejsze zmiany parametrów chropowatości powierzchni, a parametr RSm = 60,4 μm wzrósł o 25 % (tab. 5.10). W parze cierniej smarowanej olejem silnikowym 5W30 nowym próbki pierścieniowe współpracujące z płytkami zaworowymi z powłoką a-C:H:W uzyskały wartości parametrów Ra, Rz, Rq oraz RSm odpowiednio 0,3, 2,62, 0,4 oraz 81,5 μm , co stanowiło wzrost o 43, 53, 54 oraz 147 %. W porównaniu do smarowania olejem 5W30 zużytym wartości wszystkich parametrów były niższe. Płytki z powłoką a-C:H:W wykazały zmniejszenie wszystkich

parametrów chropowatości powierzchni względem nowych przeciwpróbek, osiągając wartości $R_a = 0,19 \mu\text{m}$, $R_z = 1,27 \mu\text{m}$, $R_q = 0,24 \mu\text{m}$ oraz $R_{Sm} = 43 \mu\text{m}$ (tab. 5.10). Największe zmiany parametrów chropowatości powierzchni w skojarzeniach z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W odnotowano przy smarowaniu olejem silnikowym 5W40. Parametry próbki pierścieniowej osiągnęły wartości $R_a = 0,35 \mu\text{m}$, $R_z = 2,13 \mu\text{m}$, $R_q = 0,45 \mu\text{m}$ oraz $R_{Sm} = 148 \mu\text{m}$, co stanowiło wzrost odpowiednio o 67, 25, 73 oraz 348 %. Płytki zaworowe z powłoką a-C:H:W wykazały wzrost większości parametrów chropowatości powierzchni, szczególnie parametrów R_a oraz R_{Sm} , natomiast parametr $R_z = 2,52 \mu\text{m}$ był mniejszy o 4 % względem nowej płytki (tab. 5.10). Analizując wyniki badań przy sile nacisku 2400 N stwierdzono, że największe zmiany dotyczyły parametru R_{Sm} , który we wszystkich analizowanych przypadkach wykazywał najwyższe przyrosty wartości. Podobnie jak przy sile nacisku 1800 N, skojarzenia cierne wykorzystujące płytki zaworowe utwardzone powierzchniowo charakteryzowały się na ogół mniejszymi wartościami parametrów chropowatości powierzchni niż skojarzenia z płytkami zaworowymi z powłoką a-C:H:W. Wyjątek stanowiły skojarzenia smarowane olejem silnikowym 5W30 użytym, dla których wyższe wartości parametrów uzyskano dla par współpracujących z płytkami utwardzonymi powierzchniowo.

Pomiary parametrów chropowatości powierzchni elementów par ciernych próbka pierścieniowa ulepszana cieplnie i płytka zaworowa utwardzona powierzchniowo, przy maksymalnym obciążeniu 3000 N i przy smarowaniu olejem silnikowym 5W30 użytym, wykazały znaczny wzrost chropowatości powierzchni próbki pierścieniowej względem nowych próbek. Parametry R_a , R_z , R_q oraz R_{Sm} osiągnęły odpowiednio wartości 0,6, 5,58, 0,84 oraz 87,6 μm , co stanowiło wzrost o 186, 226, 223 oraz 165 %. Największe zmiany odnotowano dla parametrów R_z oraz R_q . Płytki zaworowe utwardzone powierzchniowo wykazały natomiast niewielkie zmniejszenie parametrów R_a , R_z oraz R_q względem nowych płytek. Parametry te osiągnęły wartości odpowiednio 0,28, 1,75 oraz 0,34 μm , co odpowiadało zmniejszeniu o 3, 2 oraz 3 %, natomiast parametr $R_{Sm} = 75,4 \mu\text{m}$ wzrósł o 67 % względem nowej płytki (tab. 5.11). Zastosowanie oleju silnikowego 5W30 nowego spowodowało odmienne zmiany parametrów chropowatości powierzchni pierścieniowych ulepszanych cieplnie parametry względem oleju 5W30 użytego. Parametry R_a , R_z oraz R_q osiągnęły niższe wartości niż dla oleju 5W30 użytego i wyniosły odpowiednio 0,17, 1,3 oraz 0,23 μm , co odpowiadało zmniejszeniu o 19, 24 oraz 12 % względem nowych próbek pierścieniowych. Parametr $R_{Sm} = 106 \mu\text{m}$

Tabela 5.11. Chropowatość powierzchni elementów par ciernych po badaniach w styku niekonforemnym przy sile nacisku 3000 N

Skojarzenie pary ciernej		Próbka pierścieniowa ulepszana cieplnie – płytki zaworowa utwardzana powierzchniowo				Próbka pierścieniowa ulepszana cieplnie – płytki zaworowa z powłoką a-C:H:W			
Elementy pary		Pierścień		Przeciwpróbka		Pierścień		Przeciwpróbka	
Próbka przed eksploatacją	Parametr	Wartość [μm]		Wartość [μm]		Wartość [μm]		Wartość [μm]	
	Ra	0,21		0,29		0,21		0,31	
	Rz	1,71		1,79		1,71		2,62	
	Rq	0,26		0,35		0,26		0,41	
	RSm	33		45,2		33		48,2	
Olej	Parametr	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]	Wartość [μm]	Zmiana [%]
5W30 zużyty	Ra	0,60	185,7	0,28	-3,4	0,47	123,8	0,19	-38,7
	Rz	5,58	226,3	1,75	-2,2	5,22	205,2	1,23	-53
	Rq	0,84	223	0,34	-2,8	0,78	200	0,24	-41,4
	RSm	87,6	164,6	75,4	66,8	73,8	122,9	81,3	68,6
5W30 nowy	Ra	0,17	-19	0,65	124,1	0,61	190,4	0,78	151,6
	Rz	1,30	-23,9	3,52	96,6	4,15	142,6	0,94	-64,1
	Rq	0,23	-11,5	0,82	134,2	0,77	196	0,94	129,2
	RSm	106	220,2	81	79,2	116	250,4	140	190,4
5W40	Ra	0,26	23,8	0,38	31	0,15	-28,5	0,51	64,5
	Rz	2,36	38	3,19	78,2	1,70	-0,5	3,28	25,1
	Rq	0,35	34,6	0,52	48,5	0,22	-15,3	0,64	56
	RSm	48,1	45,3	81,2	79,6	82,4	148,9	66	36,9

wzrósł natomiast o 220 %. Płytki utwardzone powierzchniowo wykazały znaczne wzrosty parametrów chropowatości powierzchni w porównaniu z próbkami pierścieniowymi. Parametry Ra, Rz, Rq oraz RSm wyniosły odpowiednio 0,65, 3,52, 0,82 oraz 81 μm , co stanowiło wzrost o 124, 9, 134 oraz 79 % względem nowych przeciwpróbek utwardzanych powierzchniowo (tab. 5.11). Smarowanie pary ciernej olejem silnikowym 5W40 wykazało wzrost parametrów chropowatości powierzchni zarówno próbek pierścieniowych ulepszanych cieplnie, jak i płytek utwardzonych powierzchniowo względem nowych elementów. W próbkach pierścieniowych parametry Ra, Rz, Rq oraz RSm osiągnęły odpowiednio wartości 0,26, 2,36, 0,35 oraz 48,1 μm , co odpowiadało wzrostowi o 24, 38, 35 oraz 45 %. W porównaniu do smarowania olejem 5W30 zużytym i nowym zmiany parametrów były mniejsze. Płytki zaworowe utwardzane powierzchniowo osiągnęły wartości Ra = 0,38 μm , Rz = 3,19 μm , Rq = 0,52 μm oraz RSm = 81,2 μm , co stanowiło wzrost odpowiednio o 31, 78, 49 oraz 80 % względem nowych płytek (tab. 5.11). Zastosowanie płytki zaworowej z powłoką

a-C:H:W spowodowało odróżnialne zmiany parametrów chropowatości powierzchni względem skojarzeń z płytkami utwardzonymi powierzchniowo. W przypadku smarowania olejem silnikowym 5W30 zużytych próbki pierścieniowe osiągnęły wartości parametrów $R_a = 0,47 \mu\text{m}$, $R_z = 5,22 \mu\text{m}$, $R_q = 0,78 \mu\text{m}$ oraz $R_{Sm} = 73,8 \mu\text{m}$, co odpowiadało wzrostowi o 124, 205, 200 oraz 123 % względem nowych próbek pierścieniowych. W porównaniu do skojarzenia z płytką utwardzoną powierzchniowo wartości parametrów R_a , R_z , R_q oraz R_{Sm} były niższe. Przeciwpółki z powłoką a-C:H:W wykazały natomiast zmniejszenie parametrów R_a , R_z oraz R_q odpowiednio o 39, 53 oraz 41 %, natomiast parametr $R_{Sm} = 81,3 \mu\text{m}$ wzrósł o 69 % względem nowych przeciwpółek z powłoką a-C:H:W (tab. 5.11). W parze ciernej smarowanej olejem silnikowym 5W30 nowym próbki pierścieniowe ulepszone cieplnie współpracujące z płytkami zaworowymi z powłoką a-C:H:W wykazały najwyższe wartości parametrów chropowatości powierzchni spośród wszystkich analizowanych skojarzeń z tą płytką. Parametry R_a , R_z , R_q oraz R_{Sm} osiągnęły odpowiednio wartości 0,61, 4,15, 0,77 oraz 116 μm , co odpowiadało wzrostowi o 190, 143, 196 oraz 250 % względem nowych próbek pierścieniowych. Na płytkach z powłoką a-C:H:W parametr $R_a = 0,78 \mu\text{m}$ wzrósł o 152 %, parametr $R_q = 0,94 \mu\text{m}$ był większy o 129 %, natomiast parametr $R_{Sm} = 140 \mu\text{m}$ wzrósł o 190 %. Jedynie parametr $R_z = 0,94 \mu\text{m}$ był mniejszy o 64 % względem nowej przeciwpółki z powłoką a-C:H:W (tab. 5.11). W parze ciernej smarowanej olejem silnikowym 5W40 z próbką pierścieniową ulepszoną cieplnie i płytka z powłoką a-C:H:W, pomiary wykazały zmniejszenie parametrów R_a , R_z oraz R_q próbek pierścieniowych względem nowych próbek. Parametry te osiągnęły odpowiednio wartości 0,15, 1,70 oraz 0,22 μm , co odpowiadało zmniejszeniu o 29, 1 oraz 15 %. Jedynie parametr $R_{Sm} = 82,4 \mu\text{m}$ wzrósł o 149 %. W porównaniu do smarowania olejem 5W30 nowym i zużytym zmiany parametrów próbek pierścieniowych były najmniejsze. Płytki z powłoką a-C:H:W wykazały natomiast wzrost wszystkich parametrów chropowatości powierzchni względem nowych płytek. Parametry R_a , R_z , R_q oraz R_{Sm} osiągnęły odpowiednio wartości 0,51, 3,28, 0,64 oraz 66 μm , co odpowiadało wzrostowi o 65, 25, 56 oraz 37 % (tab. 5.11). Analizując wyniki badań chropowatości powierzchni przy sile nacisku 3000 N stwierdzono znaczny rozrzut wartości parametrów pomiędzy skojarzeniami wykorzystującymi płytki zaworowe utwardzone powierzchniowo i płytki z powłoką a-C:H:W. W przeciwieństwie do badań przy siłach nacisku 1800 i 2400 N nie zaobserwowano jednak jednoznacznego trendu zmian parametrów chropowatości powierzchni. Przeprowadzone badania wykazały istotny wpływ warunków smarowania

oraz rodzaju warstwy powierzchniowej na kształtowanie struktury geometrycznej powierzchni elementów par ciernych.

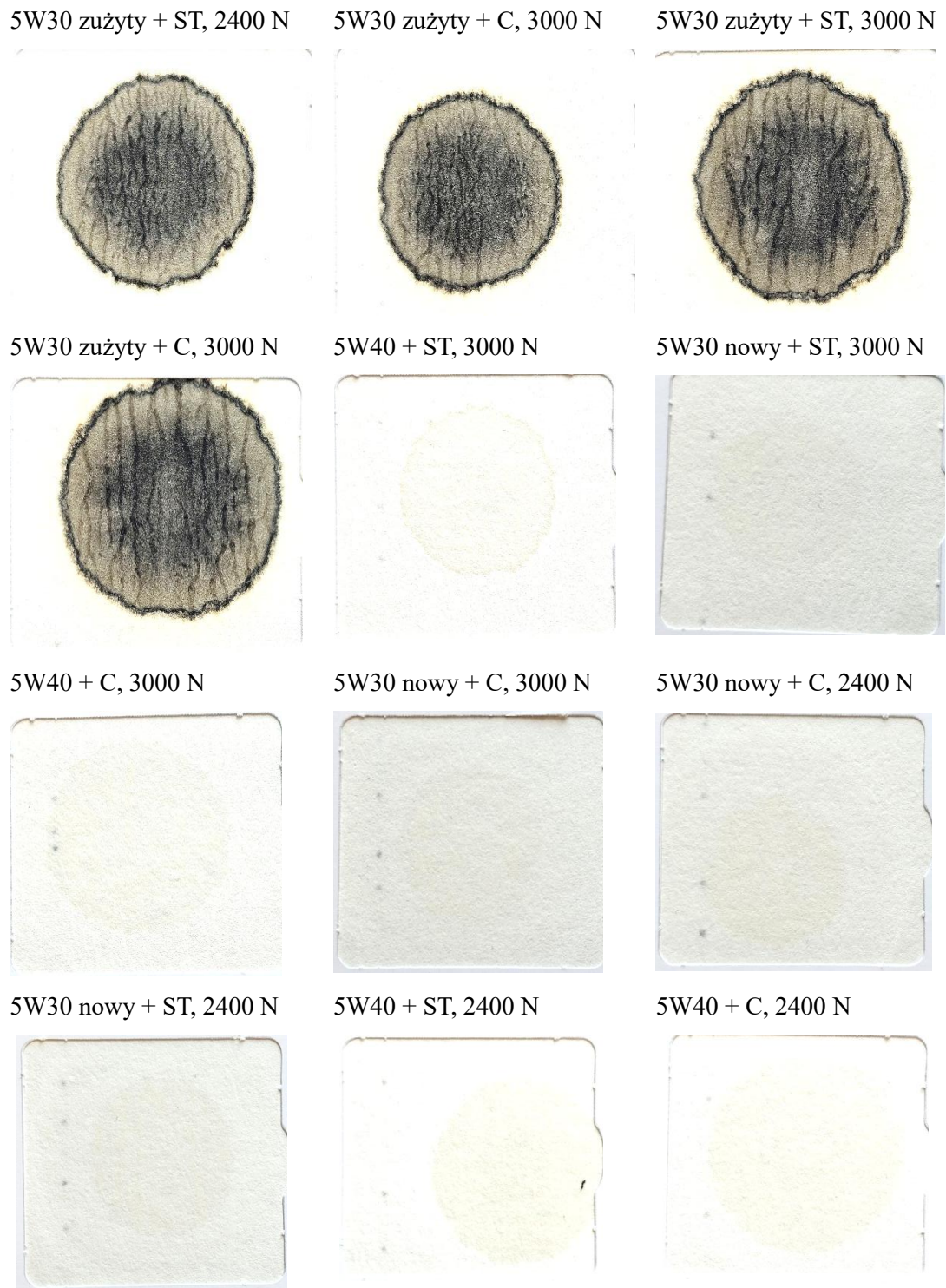
5.3. Ocena stanu degradacji badanych olejów i ich właściwości tribologicznych

5.3.1. Stan wizualny badanych olejów w teście jednokropowym

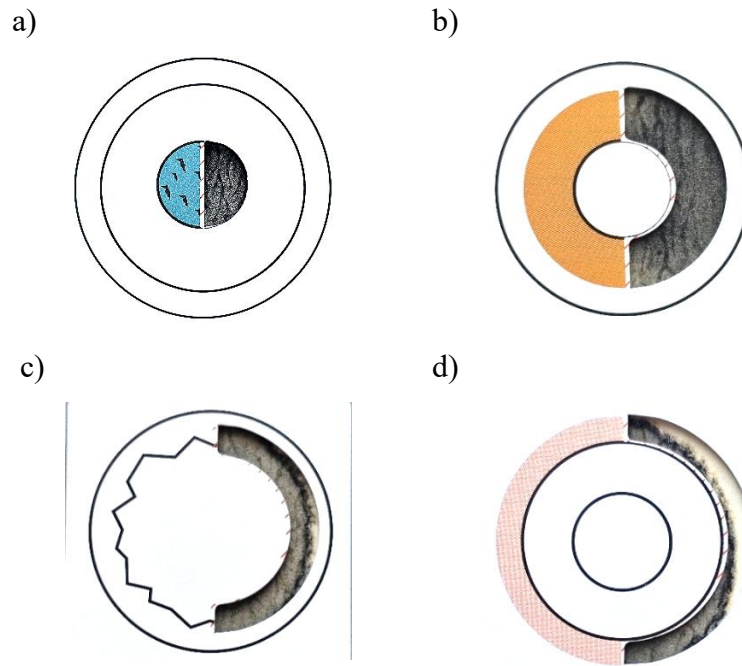
W badaniach wizualnych po próbach zużycia olejów zastosowano test komercyjny „jednokropowy”. Badania przeprowadzono dla olejów silnikowych 5W30 (nowego oraz zużytego) i oleju 5W40 po badaniach zużycia w styku niekonforemnym (rys. 5.18). Oleje nowe, nieeksploatowane w silniku spalinowym, nie wykazały istotnego zanieczyszczenia w porównaniu do olejów zużytych, co świadczy o funkcjonalności zastosowanego testu do oceny stopnia degradacji badanych próbek. Do wizualnej oceny stanu degradacji oleju po próbach zużycia wybrano 4 próbki zużytego oleju silnikowego 5W30, który smarowały obszar tarcia w parze cierniej z płytką utwardzaną powierzchniowo i płytką z powłoką węglową, w temperaturze 40 oraz 100 °C (rys. 5.18).

Wyniki testu jednokropowego oleju silnikowego 5W30 zużytego po badaniach w styku niekonforemnym w parze z płytką stalową utwardzaną powierzchniowo przy sile nacisku 2400 N wykazały następujące zmiany (rys. 5.19):

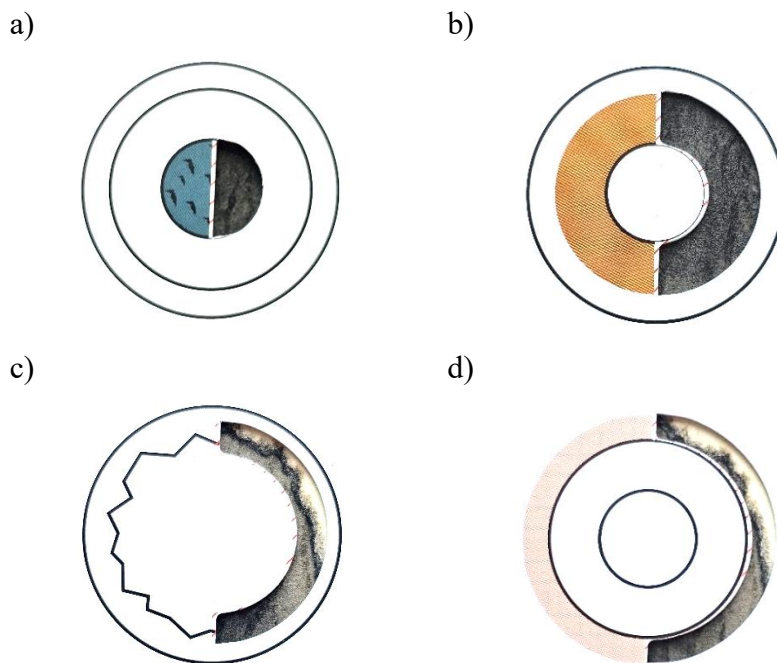
- pierwsze koło wewnętrzne - zauważalne zanieczyszczenia, najprawdopodobniej kurz, brud, cząsteczki nagaru. Może to świadczyć o przedostawaniu się wyżej wymienionych zanieczyszczeń z komory silnika pojazdu,
- drugi obszar pierścieniowy - ocena stanu oleju w oparciu o zabarwienie wykazał zmiany w oleju w granicach pozycji „7” na wzorniku. Wskazuje to na obniżenie właściwości użytkowych, przy czym możliwa jest jego dalsza eksploatacja, jednak wskazuje to na konieczność jego wymiany w najbliższym okresie,
- trzeci obszar pierścieniowy jest poszarpany, co wskazuje na zawartość innych cieczy w oleju; w tym przypadku można wskazywać na nieznaczną obecność wody, czy brak zanieczyszczeń płynem chłodzącym,
- czwarty obszar pierścieniowy ocenia zawartość paliwa w oleju nie wykazuje obecności paliwa.



Rysunek 5.18. Stan wizualny zanieczyszczeń obszaru kontrolnego testu jednokropłowego olejów silnikowych 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40 po próbach zużycia w styku konforemnym w parach ciernych przy sile nacisku 2400 N i 3000 N; (ST- z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo, C- z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W)



Rysunek 5.19. Zanieczyszczenie oleju 5W30 zużytego po próbach zużycia w parze ciernej z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo przy sile nacisku 2400 N: a) obszar pierwszy, b) obszar drugi, c) obszar trzeci, d) obszar czwarty



Rysunek 5.20. Zanieczyszczenie oleju 5W30 zużytego po próbach zużycia w parze ciernej z płytką zaworową z powłoką węglową przy sile nacisku 2400 N: a) obszar pierwszy, b) obszar drugi, c) obszar trzeci, d) obszar czwarty

Porównanie obszarów kontrolnych testu jednokropłowego dla zużytego oleju silnikowego 5W30 po próbach zużyciowych w T-05 przeprowadzonych przy siłach nacisku 2400 N i 3000 N nie wykazało istotnych różnic ani w stopniu degradacji oleju,

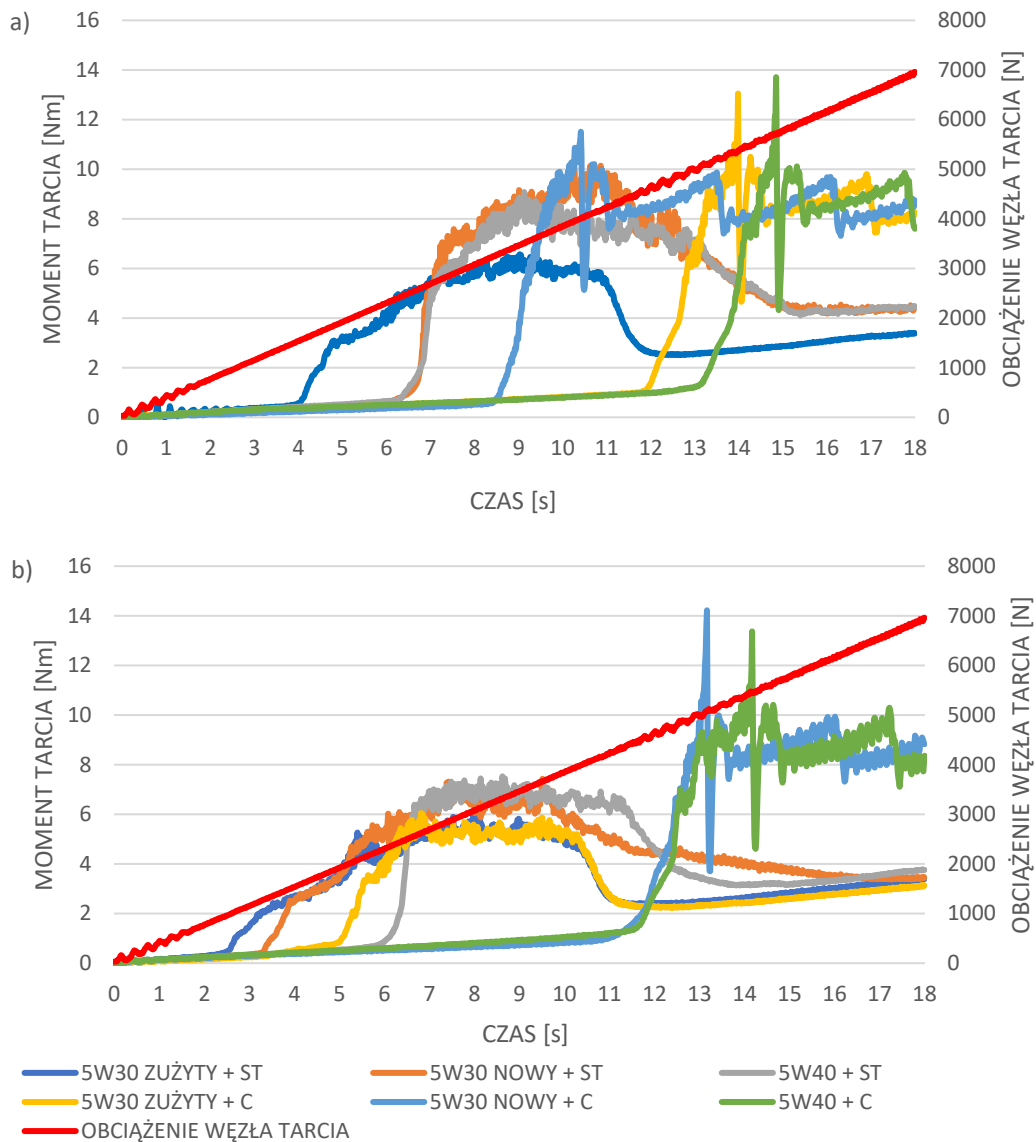
ani w ilości obecnych zanieczyszczeń. Olej silnikowy 5W30 zużyty, po odbytych badaniach przy sile nacisku 2400 N, w parze ciernej z płytką zaworową z powłoką z amorficznego wykazał następujące zmiany w oknie testu jednokropłowego (rys. 5.20):

- koło pierwsze wewnętrzne, wykazało mniej zanieczyszczeń niż w próbce olejowej pobranej przy sile nacisku 2400 N w parze stosującej płytkę zaworową utwardzaną powierzchniowo. Może to świadczyć o mniejszej ilości produktów zużycia, które powstały podczas próby tribologicznej z zastosowaniem powłoki węglowej w parze ciernej,
- drugi obszar pierścieniowy - wg wzornika olej wykazał zmiany w granicach oznaczenia „8” (przedostatni punkt w skali), co świadczy iż kondycja oleju jest gorsza, niż porównalnego oleju z pary ciernej stosującej płytkę zaworową utwardzaną powierzchniowo, przy sile nacisku 2400 N,
- trzeci obszar pierścieniowy – zaobserwowano zwiększoną nieregularność obszaru co wskazuje na większą ilość wody w próbce, jednak nie występuje płyn chłodzący;
- czwarty obszar pierścieniowy nie wykazuje w badanym oleju zawartości paliwa.

Charakterystyka poziomu zanieczyszczenia oleju silnikowego 5W30 zużytego po testach zużycia w styku konforemnym jest znacząco zbliżona, można jednak wskazać, iż olej w badaniach zużycia przy obciążeniu 2400 N miał mniej zanieczyszczeń (pierścień pierwszy) oraz był nieznacznie jaśniejszy w drugim okręgu, co świadczy o nieznacznie lepszym stanie eksploatacyjnym w porównaniu do tego oleju z badania zużycia przeprowadzonego przy obciążeniu 3000 N. Badania poziomu zanieczyszczenia olejów bez eksploatacji wykazały niemal identyczny wynik, wskazując na brak zanieczyszczeń, dobrą kondycję oraz brak zanieczyszczenia cieczami w oleju (paliwa, wody, płynu chłodniczego).

5.3.2. Porównanie właściwości przeciwzatarciowych olejów po eksploatacji w styku konforemnym

Po badaniach zużyciowych par ciernych ze stykiem konforemnym próbki pierścieniowej ulepszonej cieplnie oraz próbki pierścieniowej z powłoką a-C:H:W, do badań właściwości przeciwzatarciowych w styku czterokulowym pobrano z testera T-05 próbki olejów silnikowych. W styku czterokulowym zastosowano skojarzenia składające się tylko z kulek stalowych z utwardzoną warstwą powierzchniową (komercyjne kulki łożyskowe) oraz z trzech kulek stalowych i jednej kulki z powłoką



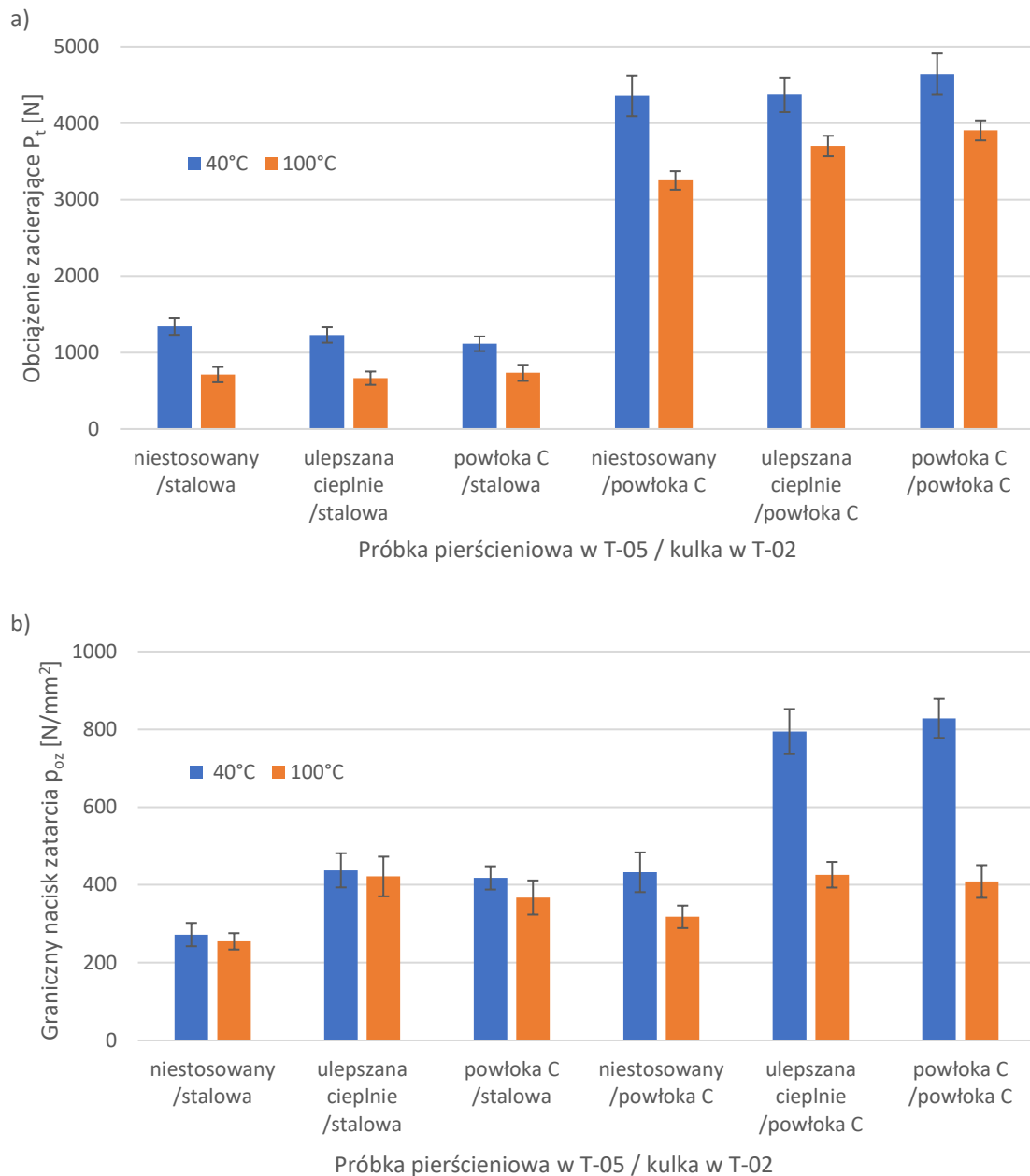
Rysunek 5.21. Moment tarcia w styku czterokulowym smarowanym olejami silnikowymi 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40 w funkcji czasu w temperaturze: a) 40 °C, b) 100°C; (ST- z próbką pierścieniową ulepszoną cieplnie, C- z próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W)

węglową a-C:H:W. W badaniach tych wykonano pomiary momentu tarcia w smarowanym skojarzeniu w zależności od narastającego obciążenia węzła tarcia, co pozwoliło na wyznaczenie wartości obciążenia zacierającego i granicznego nacisku zatarcia (rys. 5.21). Badania porównawcze właściwości przeciwtarciowych olejów silnikowych po próbach zużycia (przy najwyższym nacisku 20 MPa) i tych samych olejów silnikowych, które w próbach zużycia nie były używane. Badania właściwości przeciwtarciowych olejów w styku czterokulowym (5W30 zużyty, 5W30 nowy oraz 5W40) pozwoliły wyznaczyć wartości obciążenia zacierającego P_{oz} oraz graniczny nacisk zatarcia p_{oz} w temperaturach 40 i 100 °C (tab. 5.12).

Tabela 5.12. Właściwości przeciwzatarciowe oleju silnikowego 5W30 zużytego po badaniach w styku konforemnym

Warstwa powierzchniowa kulki	Stalowa ulepszana cieplnie			Powłoka a-C:H:W		
Olej po próbach w T-05 w styku z próbką pierścieniową	nie stosowany	ulepszana cieplnie	z powłoką a-C:H:W	Nie stosowany	ulepszana cieplnie	z powłoką a-C:H:W
Temperatura [°C]	40					
Ślad zużycia d [mm]	2,5	2	2	2,5	1,8	1,8
Obciążenie zacierające P_t [N]	1342,8	1230	1114,8	4357,2	4370,4	4640,4
Obciążenie zatarcia P_{oz} [N]	3272,4	3364,8	3216	5197,2	4948,8	5160
Graniczny nacisk zatarcia p_{oz} [N/mm ²]	272,2	437,4	418	432,4	794,2	828,1
Temperatura [°C]	100					
Ślad zużycia d [mm]	2,5	2	2	2,6	2,3	2,4
Obciążenie zacierające P_t [N]	711,6	664,8	734,4	3250,8	3700,8	3904,8
Obciążenie zatarcia P_{oz} [N]	3063,6	3242	2826	4131,6	4334,4	4527,6
Graniczny nacisk zatarcia p_{oz} [N/mm ²]	254,8	421,5	367,3	317,8	426	408,7

Obliczenia granicznego nacisku zatarcia oleju silnikowego 5W30 zużytego w temperaturze 40 °C wykazywały niższą odporność na zatarcie skojarzenia czterokulowego z kulką stalową (graniczny nacisk zatarcia był w zakresie 272,2–437,4 N/mm²), niż w skojarzeniu czterokulowym z kulką z powłoką a-C:H:W (graniczny nacisk zatarcia osiągnął wartości 432,4–828,1 N/mm²) (rys. 5.22b). Obciążenie zacierające w skojarzeniu z powłoką a-C:H:W wzrosło natomiast ponad trzykrotnie (do poziomu 4357,2–4640,4 N) w porównaniu do skojarzenia z kulką stalową (rys. 5.22a). Zwiększenie temperatury podczas prób do 100 °C spowodowało pogorszenie właściwości przeciwzatarciowych oleju 5W30 zużytego, co znalazło odzwierciedlenie w obniżeniu wartości granicznego obciążenia zatarcia zarówno dla skojarzenia z kulkami stalowymi jak i z powłoką. W skojarzeniu czterokulowym z kulką stalową odnotowano spadek do poziomu 254,8–421,5 N/mm², co wynika z zwiększonego udziału adhezyjnych mechanizmów destrukcji powierzchni w warunkach obniżonej lepkości filmu smarnego [110]. Graniczny nacisk zatarcia oleju 5W30 zużytego w skojarzeniu z kulką z powłoką węglową wyniósł od 317,8–426 N/mm² (tab. 5.12). Najniższy graniczny nacisk zatarcia oleju 5W30 zużytego nie używanego w próbach zużycia w T-05 zarejestrowano w skojarzeniu czterokulowym z kulką stalową w temperaturze 40 °C i wyniósł on 254,8 N/mm². Natomiast najwyższy nacisk zatarcia 828,1 N/mm² zanotowano w skojarzeniu



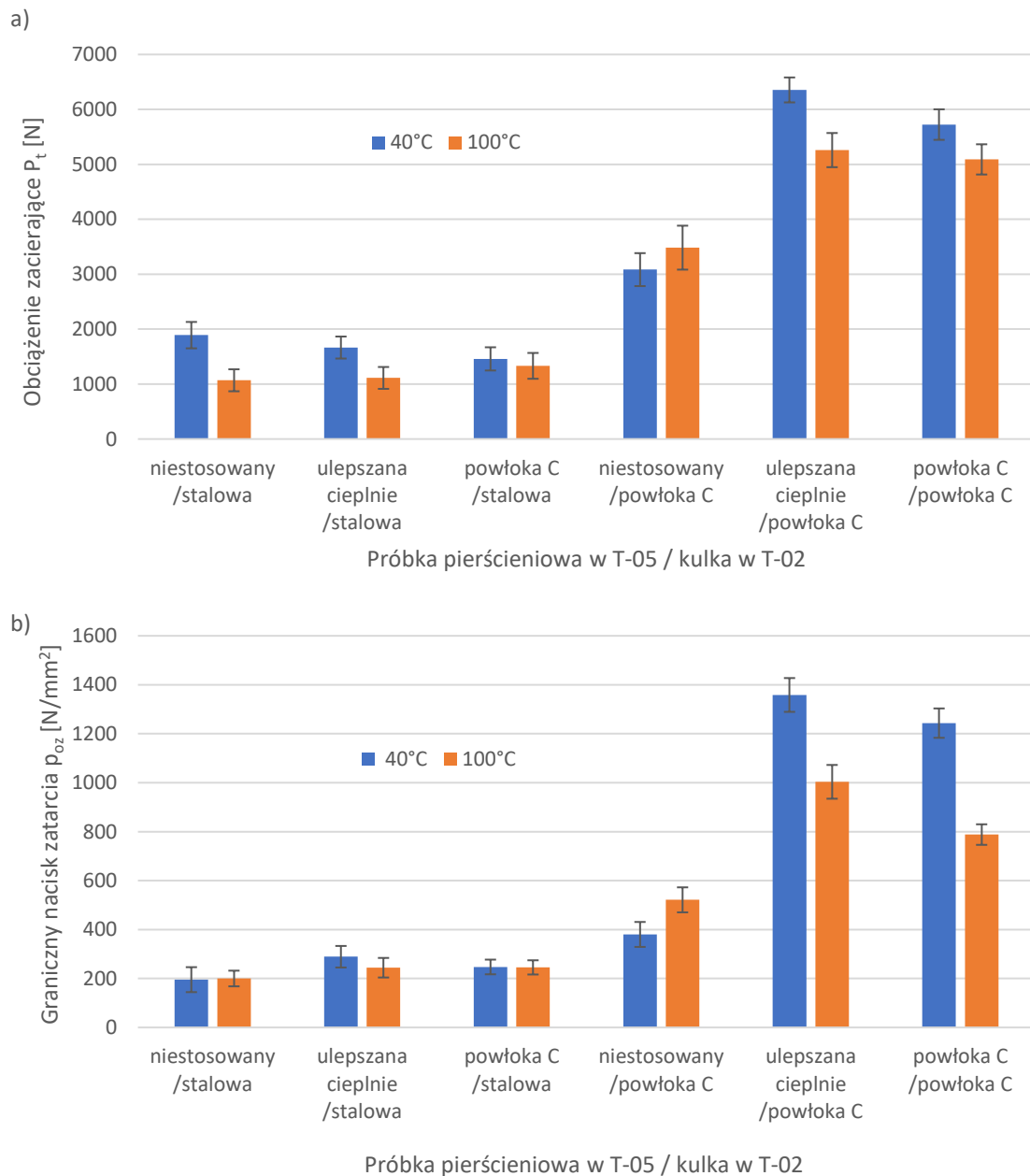
Rysunek 5.22. Właściwości przeciwzatarciowe oleju silnikowego 5W30 użytego w styku konformnym w temperaturze 40 °C i 100°C; a) obciążenie zacierające P_t , b) graniczny nacisk zatarcia p_{oz}

czterokulowym z kulką z powłoką węglową smarowanym olejem 5W30 użytym nie używanym w próbach zużycia w parze czarnej. Różnica wartości najniższego i najwyższego granicznego nacisku zatarcia to 225% (tab. 5.12). Mimo spadku odporności na zacieranie oleju w temperaturze 100 °C również w skojarzeniu czterokulowym z kulkami z powłoką a-C:H:W wartości obciążenia zacierającego były wyższe (3250,8–3904,8 N) od tych zmierzonych w skojarzeniu z kulka stalową.

Tabela 5.13. Właściwości przeciwzatarciowe oleju silnikowego 5W30 nowego po badaniach w styku konforemnym

Warstwa powierzchniowa kulki	Stalowa ulepszana cieplnie			Powłoka a-C:H:W		
Olej silnikowy po próbach w T-05	Nie stosowany	Próbka ulepszana na cieplnie	Próbka z powłoką a-C:H:W	Nie stosowany	Próbka ulepszana na cieplnie	Próbka z powłoką a-C:H:W
Temperatura [°C]	40					
Ślad zużycia d [mm]	3,1	2,4	2,6	2,3	1,6	1,6
Obciążenie zacierające P_t [N]	1891,2	1665,6	1459,2	3084	6355,2	5724
Obciążenie zatarcia P_{oz} [N]	3609,6	3201,6	3213,6	3866,4	6687,6	6121,2
Graniczny nacisk zatarcia p_{oz} [N/mm ²]	195,3	289	247,2	380	1358,4	1243,3
Temperatura [°C]	100					
Ślad zużycia d [mm]	3	2,5	2,4	2,1	1,7	1,9
Obciążenie zacierające P_t [N]	1069,2	1112,4	1332	3483,6	5259,6	5090,4
Obciążenie zatarcia P_{oz} [N]	3463,2	2934	2719,2	4422	5577,6	5470,8
Graniczny nacisk zatarcia p_{oz} [N/mm ²]	200	244,1	245,4	521,4	1003,5	788

Podczas badań w styku czterokulowym, olej silnikowy 5W30 nowy tworzy bardziej stabilny film smarny, co wpływa na większą odporność na zatarcie, szczególnie przy zastosowaniu kulek z powłoką a-C:H:W. Wartość granicznego nacisku zatarcia p_{oz} oleju silnikowego 5W30 nowego w badaniu w temperaturze 40 °C w skojarzeniu czterokulowym z kulką stalową bez wcześniejszej pracy w T-05 wyniosła najmniej względem pozostałych skojarzeń ciernych. W badaniach w temperaturze 40 °C był on równy 195,3 N/mm², a w 100 °C 200 N/mm² (tab. 5.13). Różnice wielkości przeciwzatarciowych są 2-3 krotnie wyższe przy porównaniu do skojarzeniach z kulką stalową i z kulką z powłoką a-C:H:W (rys. 5.23). Olej 5W30 nowy używany do smarowania pary z próbką ulepszaną cieplnie w T-05 w styku czterokulowym z kulką stalową w temperaturze 40 °C, uzyskał graniczny nacisk zatarcia $p_{oz} = 289$ N/mm², a olej nie używany w próbach w T-05 nacisk $p_{oz} = 195,3$ N/mm². Natomiast ten olej w smarowaniu pary cierniej z próbką pierścieniową węglową z T-05 uzyskał graniczny nacisk zatarcia $p_{oz} = 247,2$ N/mm², co jest wartością zbliżoną do wcześniejszej wyników. W przypadku oleju 5W30 nowego smarującego pary z próbkami pierścieniowymi ulepszanymi cieplnie i z powłoką węglową w T-05 podczas badań w skojarzeniu czterokulowym z kulką węglową wykazano odporność na zatarcie kolejno



Rysunek 5.23. Właściwości przeciwwzatarciowe oleju 5W30 nowego w temperaturze 40 °C i 100°C;

a) obciążenie zacierające P_t , b) graniczny nacisk zatarcia p_{oz}

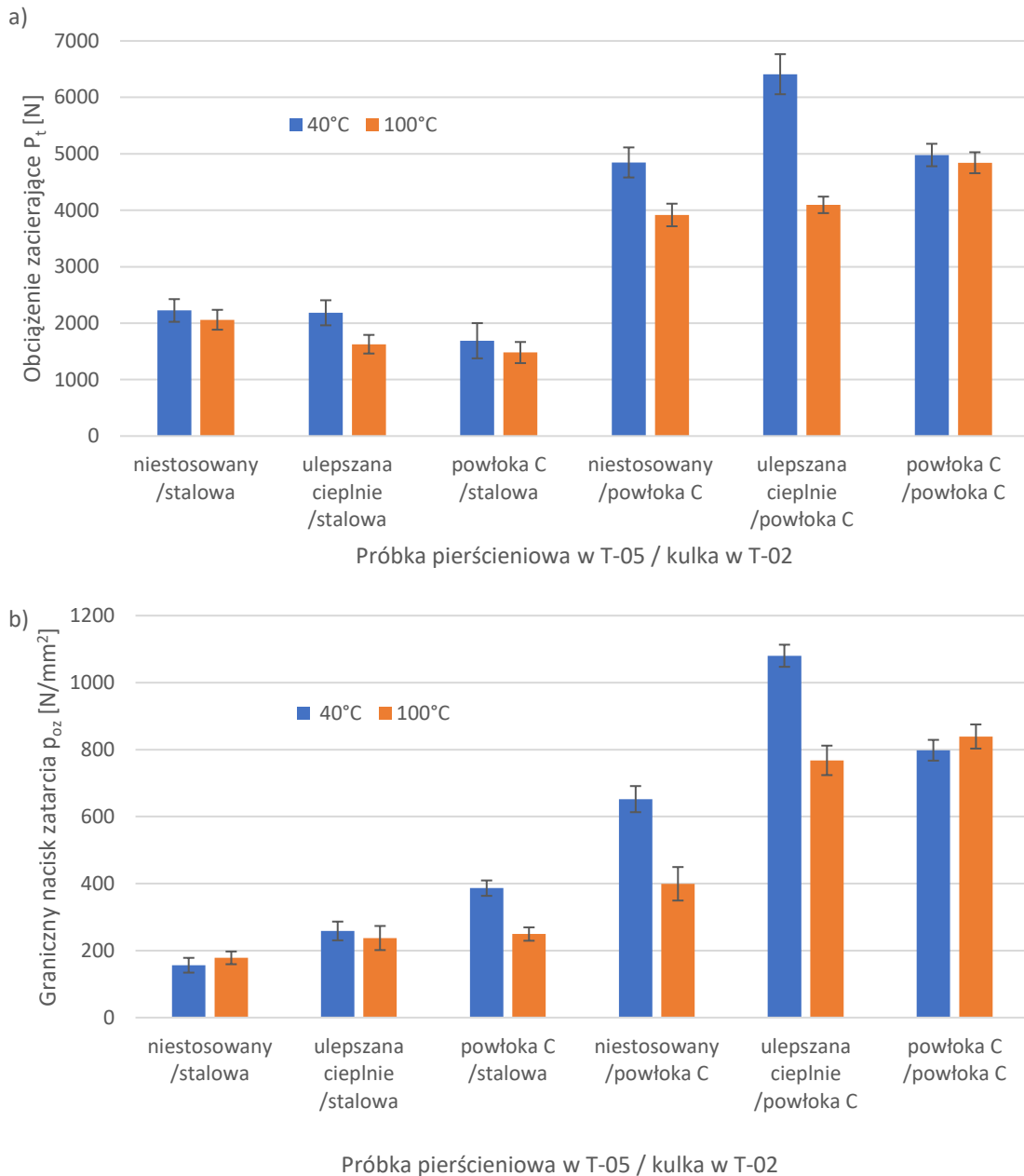
1358,4 N/mm² i 1243,3 N/mm² i są to wartości czterokrotnie większe w porównaniu skojarzenia z kulką stalową (tab. 5.13). W badaniach w 100 °C najwyższą wartość obciążenia zacierającego $P_t = 5259,6$ N oleju 5W30 nowego zarejestrowano dla oleju z pary z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie w badaniach T-05 oraz w styku czterokulowym z kulką stalową w badaniach T-02 (rys. 5.23a). Najniższa wartość tego parametru wyniosła 1069,2 N i zmierzono ją w skojarzeniu z kulką stalową w skojarzeniu czterokulowym dla tego oleju, który nie był stosowany w próbach zużycia w T-05. Graniczny nacisk zatarcia $p_{oz} = 200$ N/mm² obliczony dla oleju 5W30 nowego i nie

Tabela 5.14. Właściwości przeciwzatarciowe oleju silnikowego 5W40 po badaniach w styku konforemnym

Warstwa powierzchniowa kulki	Stalowa ulepszana cieplnie			Powłoka a-C:H:W		
Olej silnikowy po próbach w T-05	Nie stosowany	Próbka ulepszana na cieplnie	Próbka z powłoką a-C:H:W	Nie stosowany	Próbka ulepszana na cieplnie	Próbka z powłoką a-C:H:W
Temperatura [°C]	40					
Ślad zużycia d [mm]	3,3	2,5	2	2,1	1,8	1,9
Obciążenie zacierające P_t [N]	2224,8	2184	1688,4	4846,8	6410,4	4978,8
Obciążenie zatarcia P_{oz} [N]	3274,8	3109,2	2972,4	5532	6730,8	5540,8
Graniczny nacisk zatarcia p_{oz} [N/mm ²]	156,3	258,6	386,4	652,2	1080,2	798,1
Temperatura [°C]	100					
Ślad zużycia d [mm]	3	2,4	2,2	2,5	1,8	1,8
Obciążenie zacierające P_t [N]	2060,4	1627,2	1479,6	3916,8	4095,6	4842
Obciążenie zatarcia P_{oz} [N]	3086,4	2631,6	2322	4801,2	4785,2	5228,4
Graniczny nacisk zatarcia p_{oz} [N/mm ²]	178,3	237,5	249,4	399,4	767,9	839,1

używanego w próbach zużycia w T-05 po badaniach w skojarzeniu czterokulowym z kulką stalową był o 5 razy mniejszy niż graniczny nacisk zatarcia dla tego oleju w badaniu z parą cierną z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie w T-05 i po badaniach w skojarzeniu z kulką z powłoką a-C:H:W ($p_{oz} = 1003,5 \text{ N/mm}^2$). Analizując właściwości przeciwzatarciowe, można stwierdzić, iż pary cierne stosowane ze stykiem czterokulowym z kulkami z powłoką a-C:H:W zachowują znacznie korzystniejsze właściwości przeciwzużyciowe, także w badaniach przy wyższej temperaturze a różnice wartości parametrów w porównaniu do kulek stalowych są 3-5 krotnie wyższe (tab. 5.13).

Właściwości przeciwzatarciowe oleju silnikowego 5W40 w temperaturze 40 °C są znacznie wyższe w skojarzeniach z kulką z powłoką a-C:H:W w porównaniu do skojarzenia z kulką stalową (rys. 5.24). Graniczny nacisk zatarcia obliczony dla oleju silnikowego 5W40 (nie używany w badaniach zużyciowych w T-05) w badaniach w skojarzeniu czterokulowym z kulą stalową wyniósł $p_{oz}=156,3 \text{ N/mm}^2$, natomiast w skojarzeniu z kulką z powłoką węglową i próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie w T-05, wartość wyniosła $1080,2 \text{ N/mm}^2$, co odpowiada wzrostowi o około 591% (tab. 5.14).



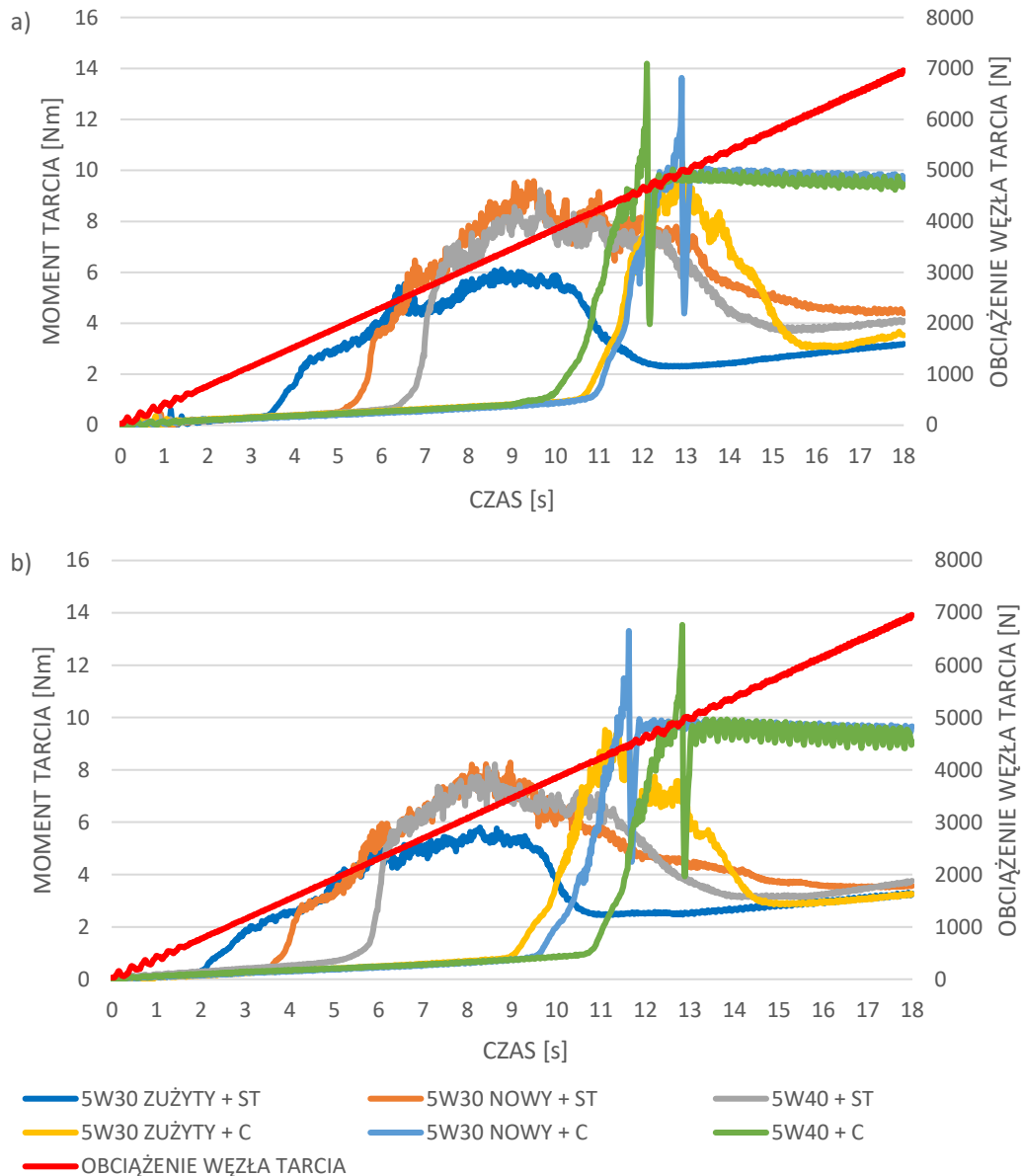
Rysunek 5.24. Właściwości przeciwzatarciowe oleju 5W40 w temperaturze 40 °C i 100°C; a) obciążenie zacierające P_t , b) graniczny nacisk zatarcia p_{oz}

Podczas badań w podwyższonej temperaturze, 100 °C, wartości parametrów przeciwzatarciowych zachowywały się podobnie jak w temperaturze 40 °C (rys. 5.24). Najwyższa wartość obciążenia zacierającego $P_t = 4842$ N wyznaczona została dla oleju 5W40 z badań zużycia z próbką pierścieniową węglową w T-05 i w czterokulowym skojarzeniu z kulką węglową a-C:H:W. W skojarzeniu czterokulowym z kulką stalową i próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W w T-05, obciążenie zacierające wyniosło $P_t = 1479,6$ N i było o 3362,4 N niższe niż w poprzednim zestawieniu skojarzeń (tab. 5.14). Taki sam trend zmian wystąpił w wyznaczonym obciążeniu zatarcia P_{oz} , gdzie

kolejno dla tych skojarzeń wyniósł 5228,4 N oraz 2322 N (o 2906,4 N wyższe dla oleju 5W40 z pary cieńrej z próbką pierścieniową węglową i skojarzeniu czterokulowym z kulką węglową). Graniczny nacisk zatarcia $p_{oz} = 178,3 \text{ N/mm}^2$ był najniższy dla oleju 5W40 nie używanego w próbach zużycia i w skojarzeniu czterokulowym z kulką stalową natomiast największa wartość $p_{oz} = 839,1 \text{ N/mm}^2$ została zarejestrowana dla oleju 5W40 z badań zużycia z próbką pierścieniową z powłoką węglową w badaniach T-05 i w skojarzeniu czterokulowym z kulką węglową (rys. 5.24b). Parametry przeciwwzatarciowe badanych olejów wykazują znacznie istotniejszą różnicę w ich wartościach w zależności od rodzaju obróbki kulki w aparacie czterokulowym (stalowej lub węglowej) niż ze wzrostem temperatury badań z 40 °C do 100 °C (tab. 5.14).

5.3.3. Porównanie właściwości przeciwwzatarciowych olejów po eksploatacji w styku niekonforemnym

Badania właściwości przeciwwzyciowych olejów badanych w styku niekonforemnym obejmowały próbki olejów wytworzone podczas procesów zużycia w parach ciernych składających się z próbki pierścieniowej ulepszonej cieplnie i z płytki zaworowej (utwardzonej powierzchniowo i z powłoką a-C:H:W). Oleje te badano w skojarzeniu czterokulowym składającym się tylko z kulek stalowych z utwardzoną warstwą powierzchniową lub skojarzeń, gdzie zastosowano jedną z kulkę z powłoką węglową a-C:H:W, w temperaturach 40 i 100 °C i (rys. 5.25). Zarejestrowane przebiegi momentu tarcia oraz zmierzone ślady zużycia na badanych kulkach pozwoliły na określenie parametrów przeciwwzyciowych środków smarnych, takich jak obciążenie zacierające i graniczny nacisku zatarcia dla badanych olejów sprzed i po próbach zużycia w styku niekonforemnym. W badaniach oleju silnikowego 5W30 zużytego w temperaturze 40°C, obciążenie zacierające P_t w skojarzeniu czterokulowym z kulką stalową wyniosło 1342,8 N (oleju nie użyto w próbach zużycia w T-05), a olej ten stosowany w próbach zużycia w T-05 w parach z płytkami utwardzonymi powierzchniowo oraz z płytkami z powłoką węglową wykazał tendencję do zacierania skojarzenia czterokulowego przy 1098 N oraz 1051,2 N. Zastosowanie w skojarzeniu czterokulowym kulki z powłoką a-C:H:W spowodowało istotny wzrost odporności na zacieranie i wyznaczone obciążenie zacierające P_t wynosiło 3676,8–4357,2 N (tab. 5.15). Analogiczny trend zmian odnotowano dla granicznego nacisku zatarcia p_{oz} oleju 5W30 zużytego, wyniki obliczeń p_{oz} wykazały, że w skojarzeniu czterokulowym z kulką stalową wyniósł 272,2–437,4 N/mm², a w skojarzeniu z użyciem kulki z powłoką



Rysunek 5.25. Moment tarcia w styku czterokulowym smarowanym olejami silnikowymi po eksploatacji w styku niekonforemnym 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40 w funkcji czasu w temperaturze: a) 40 °C, b) 100°C; (ST- z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo, C- z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W)

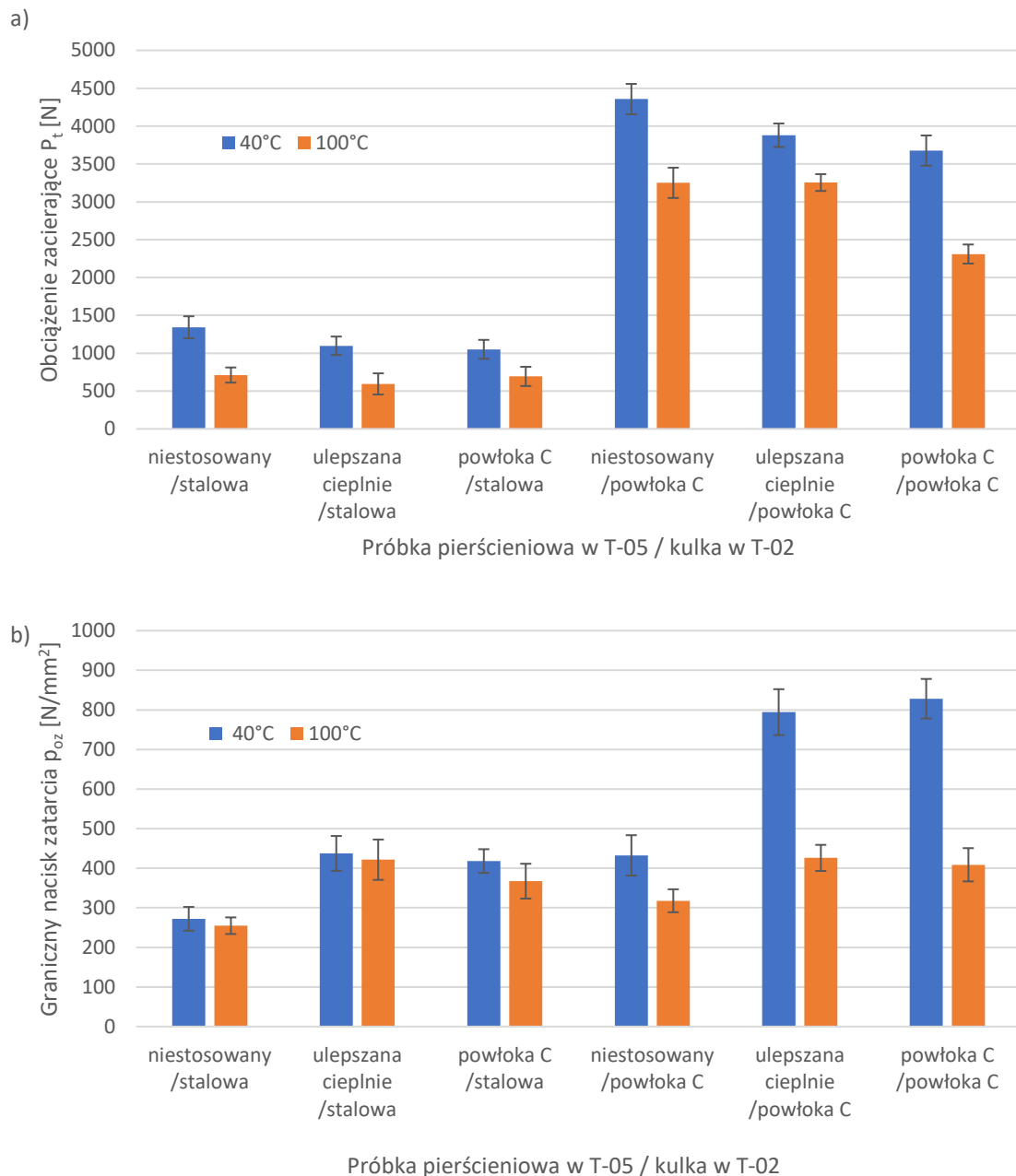
a-C:H:W $p_{oz} = 432,4\text{--}828,1\text{ N/mm}^2$, co wskazuje na znaczne zwiększenie odporności na zacieranie oraz zmniejszenie skłonności do zatarcia [88].

W temperaturze 100 °C w skojarzeniach czterokulowych z kulkami stalowymi wartości P_t wynosiły 594–711,6 N, kolejno dla oleju 5W30 zużytego z pary ciernej z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo (rys. 5.26a), z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo i oleju 5W30 zużytego nie używanego w próbach zużycia.

Tabela 5.15. Właściwości przeciwzatarciowe olejów silnikowych po badaniach w styku niekonforemnym

Warstwa powierzchniowa kulki	Ulepszana cieplnie			Powłoka a-C:H:W		
Olej silnikowy po próbach w T-05	Nie stosowany	Płytką utwardzoną na powierzchniowo	Płytką z powłoką a-C:H:W	Nie stosowany	Płytką utwardzoną powierzchniowo	Płytką z powłoką a-C:H:W
5W30 zużyty						
Temperatura [°C]	40					
Obciążenie zacierające P_t [N]	1342,8	1098	1051,2	4357,2	3879,6	3676,8
Graniczny nacisk zatarcia p_{oz} [N/mm ²]	272,2	437,4	352,8	432,4	794,2	828,1
Temperatura [°C]	100					
Obciążenie zacierające P_t [N]	711,6	594	693,6	3250,8	3254,4	2310
Graniczny nacisk zatarcia p_{oz} [N/mm ²]	254,8	421,5	367,3	317,8	426	408,7
5W30 nowy						
Temperatura [°C]	40					
Obciążenie zacierające P_t [N]	1891,2	1754,4	1988,4	3084	3984	5776,8
Graniczny nacisk zatarcia p_{oz} [N/mm ²]	195,3	229,5	234,5	380	616,8	554
Temperatura [°C]	100					
Obciążenie zacierające P_t [N]	1069,2	1135,2	1288,8	3483,6	3504	3464,4
Graniczny nacisk zatarcia p_{oz} [N/mm ²]	200	187,4	242,6	521,4	415	362,3
5W40						
Temperatura [°C]	40					
Obciążenie zacierające P_t [N]	2224,8	2217,6	2540,4	4846,8	3630	4096,8
Graniczny nacisk zatarcia p_{oz} [N/mm ²]	156,3	202	300,5	652,2	579,3	632,2
Temperatura [°C]	100					
Obciążenie zacierające P_t [N]	2060,4	1938	1512	3916,8	3967,2	3907,2
Graniczny nacisk zatarcia p_{oz} [N/mm ²]	178,3	223,9	182,8	399,4	615,5	408,6

W przypadku skojarzenia czterokulowego z kulką z powłoką a-C:H:W obciążenie zacierające wyniosło od 2310 N (olej 5W30 zużyty z pary czarnej z płytką zaworową z powłoką węglową w T-05) do 3254,4 N (olej 5W30 zużyty z pary z płytką utwardzoną powierzchniowo w T-05), co potwierdziło że powłoka amorficznego węgla posiada właściwości ochronne również w wyższej temperaturze (tab. 5.15). Wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} zawierały się w przedziale 254,8–421,5 N/mm² w skojarzeniach czterokulowych z kulką stalową i 317,8–426 N/mm² w skojarzeniach czterokulowych



Rysunek 5.26. Właściwości przeciwwzatarciowe oleju 5W30 użytego w temperaturze 40 °C i 100°C;

a) obciążenie zacierające P_t , b) graniczny nacisk zatarcia p_{oz}

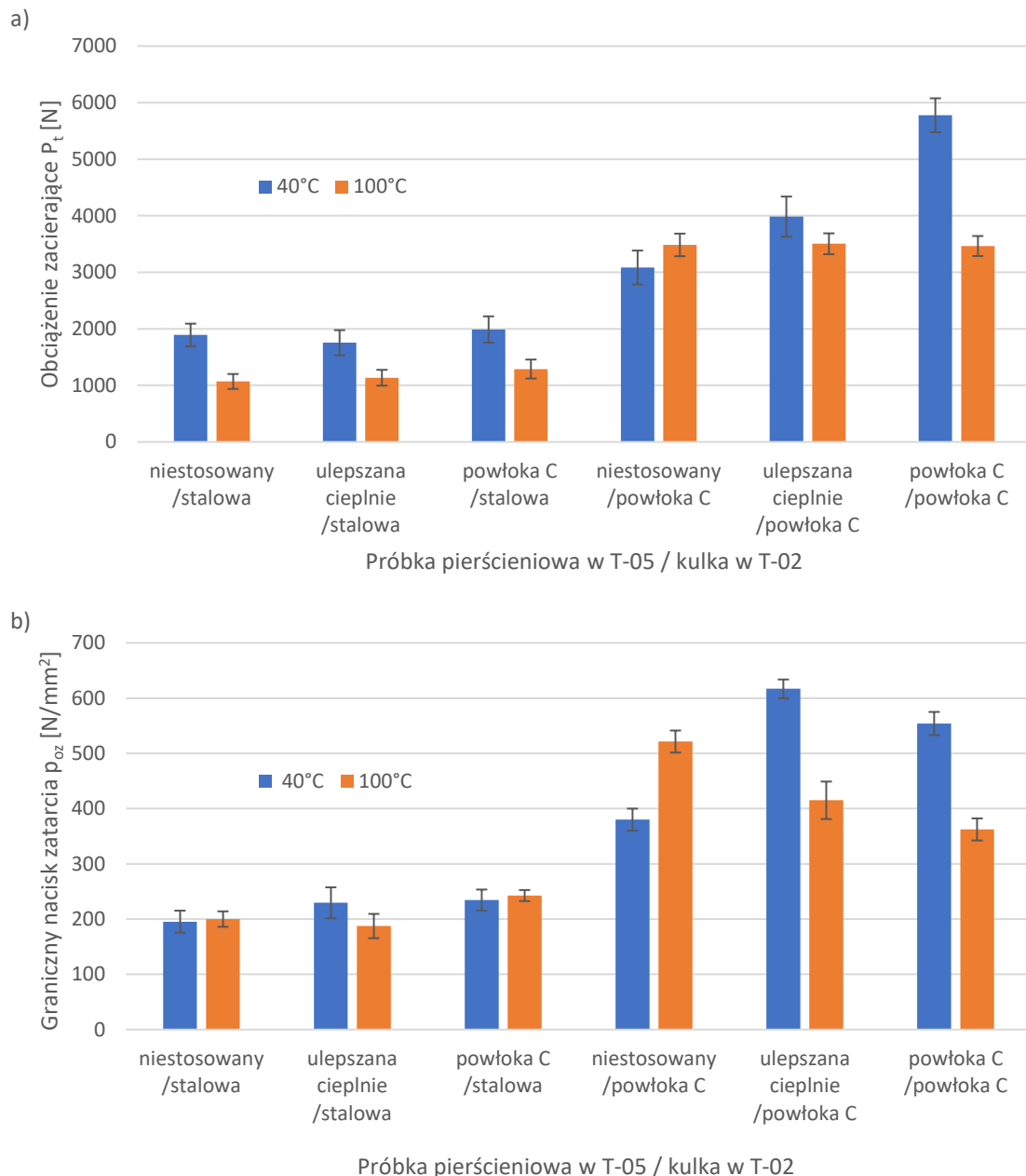
z kulką z powłoką a-C:H:W. Dla oleju 5W30 użytego po użyciu w parze cierniej w T-05 z płytką zaworową z powłoką węglową i w skojarzeniu z kulką stalową w skojarzeniu czterokulowym obliczone $p_{oz} = 421,5 \text{ N/mm}^2$ i było wyższe od obliczonego w skojarzeniu czterokulowym z kulką z powłoką węglową ($p_{oz} = 408,7 \text{ N/mm}^2$) (rys. 5.26b).

Obciążenie zacierające P_t w temperaturze 40°C w kolejnych zestawieniach skojarzeń: olej silnikowy 5W30 nowy i kulka stalowa ze stykiem czterokulowym, olej 5W30 smarujący parę cierną z płytką utwardzoną powierzchniowo w T-05 i kulka stalowa w skojarzeniu czterokulowym, olej 5W30 smarujący parę cierną z użyciem płytki

zaworowej z powłoką węglową i stalowej kulki w skojarzeniu czterokulowym wynosiło odpowiednio 1891,2 N, 1754,4 N oraz 1988,4 N (rys. 5.27). Graniczny nacisk zatarcia w tych warunkach wyniósł odpowiednio 195,3 N/mm², 229,5 N/mm² oraz 234,5 N/mm². Zastosowanie ze stykiem czterokulowym kulki pokrytej powłoką a-C:H:W spowodowało wzrost obciążeń zacierających P_t do 3084 N, 3984 N i 5776,8 N (tab. 5.15). Graniczny nacisk zatarcia osiągnął wartości dla olejów w tych skojarzeniach kolejno 380 N/mm², 616,8 N/mm² oraz 554 N/mm². Uzyskane wyniki wskazują, że stosowanie powłoki a-C:H:W na płytkach zaworowych istotnie zwiększa odporność układu na zacieranie, można wiązać to z korzystnym oddziaływaniem powłoki na warunki tarcia i smarowania, prowadzącym do poprawy zdolności filmu smarowego do przenoszenia obciążeń.

Zwiększenie temperatury w obszarze styku do 100 °C w skojarzeniu czterokulowym z kulką stalową i z olejem silnikowym 5W30 nowym spowodowało zmniejszenie obciążenia zacierającego $P_t = 1069,2$ N, z olejem 5W30 nowym smarującym parę cierną z płytką utwardzoną powierzchniowo $P_t = 1135,2$ N i z olejem smarującym parę cierną z płytką z powłoką węglową $P_t = 1288,8$ N (rys. 5.27a). Graniczny nacisk zatarcia p_{oz} przy temperaturze 100°C zmalał dla wyżej wymienionych skojarzeń ciernych do wartości 200 N/mm², 187,4 N/mm² oraz 242,6 N/mm² (rys. 5.27b). Natomiast wartości obciążenia zacierającego P_t wyznaczone dla oleju silnikowego 5W30 nowego w skojarzeniu czterokulowym z kulką pokrytą powłoką z amorficznego węgla wyniosły odpowiednio: 3483,6 N, 3504,0 N i 3464,4 N (tab. 5.15). Obliczony graniczny nacisk zatarcia p_{oz} dla badanych skojarzeń w styku czterokulowym z kulką z powłoką z amorficznego węgla w temperaturze 100°C skojarzeń osiągnął wartości 521,4 N/mm², 415 N/mm² i 362,3 N/mm².

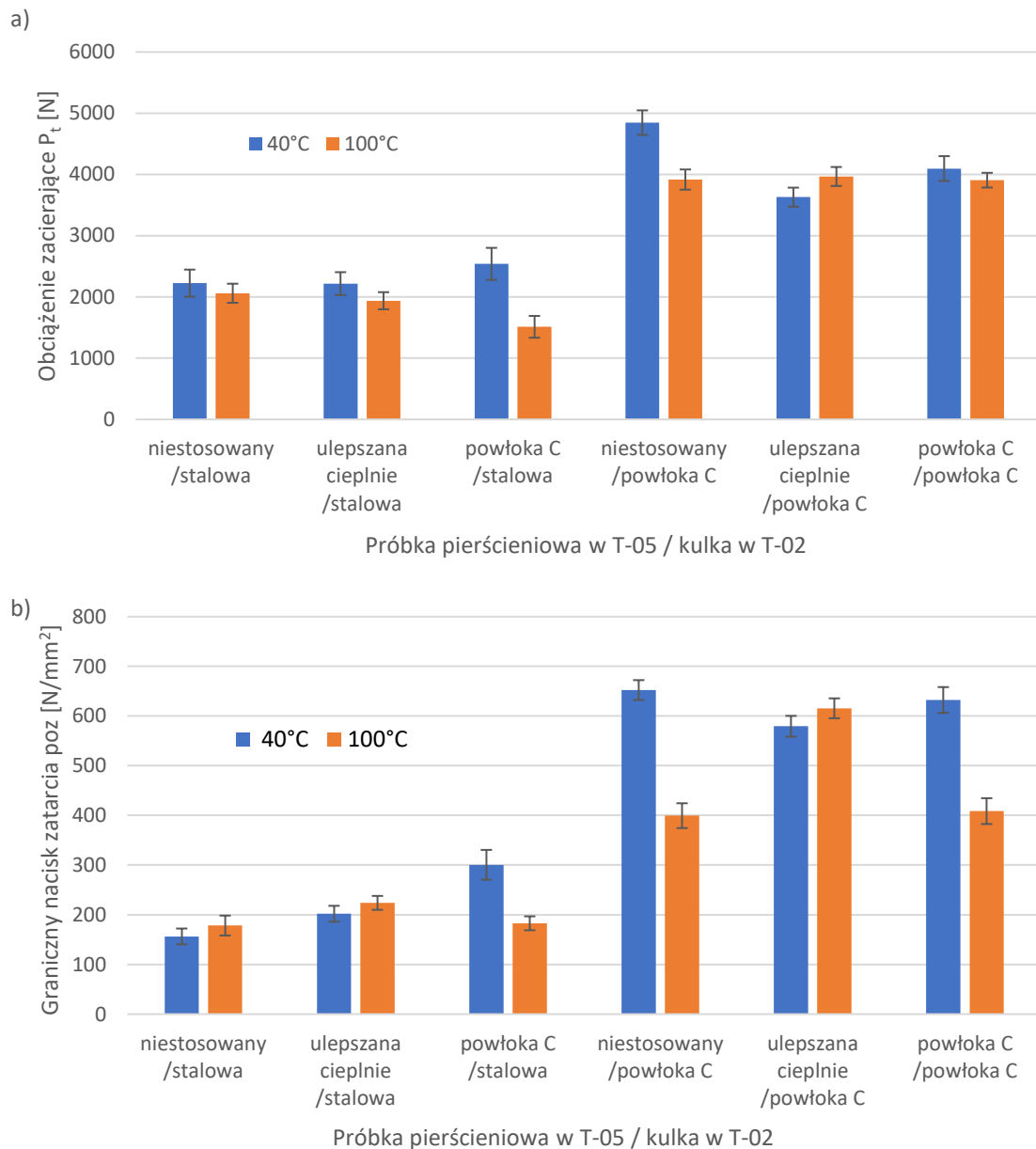
Badania przeciwzatarciowe oleju silnikowego 5W40 (nie używany w próbach zużycia), w skojarzeniu czterokulowym z kulką stalową w temperaturze 40°C, wykazały, że w skojarzeniu czterokulowym z kulką stalową początek zacierania wystąpił przy obciążeniu zacierającym $P_t = 2224,8$ N, a w skojarzeniu czterokulowym z kulką z powłoką węglową $P_t = 4846,8$ N (rys. 5.28a). Natomiast obciążenie zacierające z użyciem kulki stalowej i z olejem silnikowym 5W40 smarującym parę cierną z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo $P_t = 2217,6$ N, a z olejem smarującym parę cierną z płytką zaworową z powłoką węglową $P_t = 2540,4$ N (tab. 5.15).



Rysunek 5.27. Właściwości przeciwzatarciowe oleju 5W30 nowego w temperaturze 40 °C i 100°C;

a) obciążenie zacierające P_t , b) graniczny nacisk zatarcia p_{oz}

Wartość obciążenia zacierającego oleju 5W40 w styku czterokulowym kulki z powłoką węglową wyniosła $P_t = 4846,8$ N i jest to najwyższa wartość. Obciążenie zacierające oleju 5W40 smarującego parę cierną w T-05 z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo równało się 3630 N, a oleju 5W40 smarującego parę cierną z płytką zaworową z powłoką węglową $P_t = 4096,8$ N (rys. 5.28a). Obliczony graniczny nacisk zatarcia p_{oz} w temperaturze 40 °C w skojarzeniach czterokulowych z kulką stalową wyniósł odpowiednio 156,3 N/mm² dla oleju 5W40 nie używanego w T-05, 202 N/mm²



Rysunek 5.28. Właściwości przeciwzatarciowe oleju 5W40 w temperaturze 40 °C i 100°C; a) obciążenie zacierające P_t , b) graniczny nacisk zatarcia p_{oz}





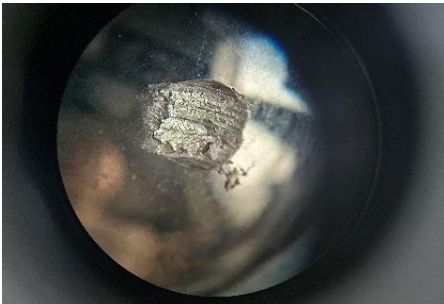

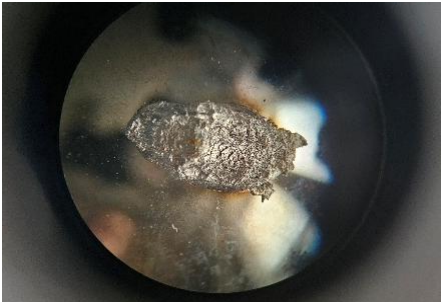
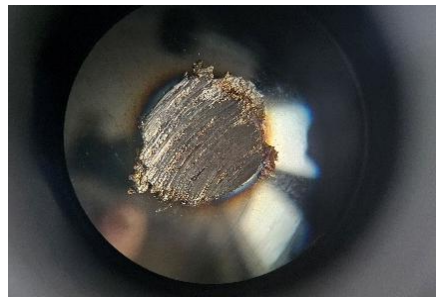
dla oleju 5W40 po próbach zużycia w T-05 z płytką zaworową komercyjną oraz 300,5 N/mm² dla oleju 5W40 po próbach zużycia w T-05 z płytką zaworową z powłoką węglową. Natomiast w skojarzeniu czterokulowym z kulą pokrytą powłoką a-C:H:W graniczny nacisk zatarcia p_{oz} osiągnął wartości 652,2 N/mm², 579,3 N/mm² i 632,2 N/mm². Wyniki te wskazują, że powłoka a-C:H:W znacząco zwiększa odporność układu na zacieranie oraz poprawia nośność filmu smarowego tworząc korzystne warunki do powstania granicznej warstwy smarnej zabezpieczające przed zatarciem pary ciernej [17, 29].

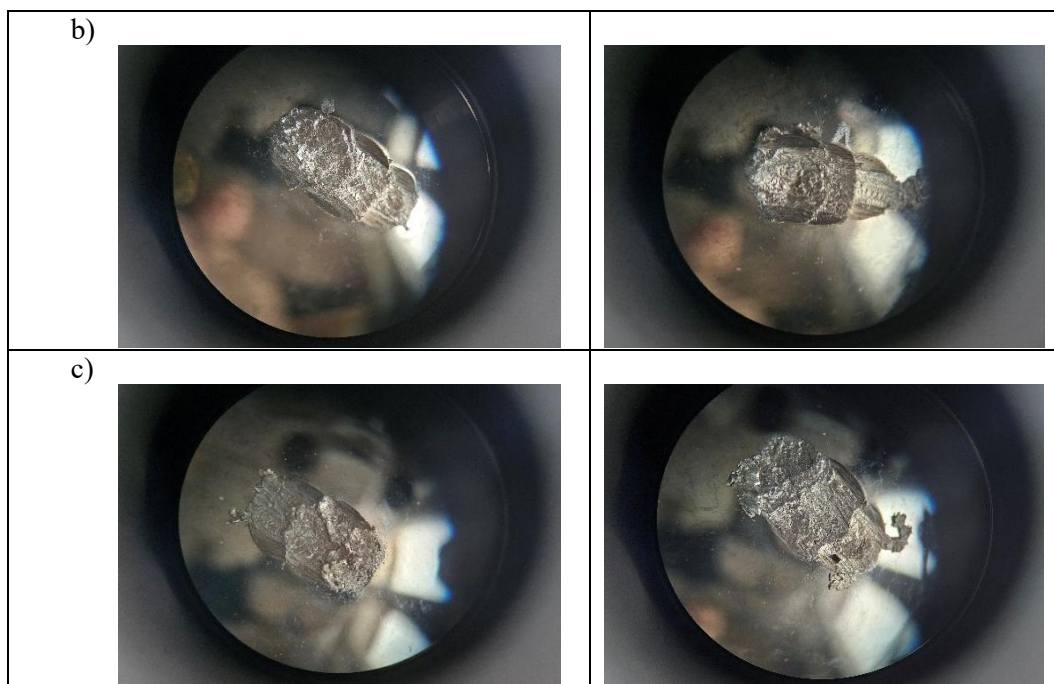
Zwiększenie temperatury z 40°C do 100°C w skojarzeniach czterokulowych z kulką pokrytą powłoką a-C:H skutkowało około 2–3 krotnym wzrostem właściwości przeciwzatarciowych w porównaniu ze skojarzeniami z kulkami stalowymi (rys. 5.28). Podobnie jak w przypadku badań przeprowadzonych dla pozostałych olejów, większy wpływ na odporność układu na procesy zacierania miało zastosowanie kulki z powłoką a-C:H niż zmiana temperatury badania. Otrzymane wyniki wskazują, że rodzaj materiału warstwy wierzchniej elementów współpracujących odgrywa istotniejszą rolę w kształtowaniu właściwości przeciwzatarciowych niż wzrost temperatury w obszarze tarcia.

5.3.4. Ocena warstw powierzchniowych skojarzeń ciernych po eksploatacji w styku konforemnym

W wyniku procesów tarcia w styku czterokulowym obserwuje się zużycie i deformacje plastyczne materiałów pod wpływem obciążenia mechanicznego i temperatury w której przeprowadzano próby zacierania. Na zdjęciach mikroskopowych kulek widoczne są ślady zużycia eksploatacyjnego w postaci licznych deformacji, nierówności warstwy powierzchni i zmian strukturalnych materiału. Istotnymi cechami powierzchni w obszarze zużycia kulek, w próbach w temperaturze 40°C, były rysy, bruzdy, mikropęknięcia, rozwarstwienia materiału, ziarnista struktura świadcząca o zużyciu adhezyjnym i deformacje plastyczne szczególnie widoczne na kulkach stosowanych w skojarzeniu czterokulowym smarowanym olejem silnikowym 5W30 nowym (zarówno w skojarzeniu z kulkami stalowymi, jak i pokrytymi powłoką węglową)(tab. 5.16b) Zbliżone zmiany obserwowano również w skojarzeniu z kulką z powłoką węglową smarowanym olejem 5W40 po badaniach zużycia w T-05 z próbką pierścieniową ulepszoną cieplnie (tab. 5.16c). Wydłużony kształt wytarcia na kulkach może wskazywać przede wszystkim na występowanie deformacji plastycznej materiału w wyniku lokalnego uplastycznienia pod wpływem obciążenia i jego przemieszczenia w kierunku ruchu, lub powstawaniem mikropęknięć i rozwarstwień materiału kulki. Zmiany te są wyjątkowo widoczne na kulkach w skojarzeniach smarowanych olejem silnikowym 5W30 nowym, który był użyty w parach ciernych z próbką pierścieniową ulepszoną cieplnie podczas badań zużycia w T-05 i w skojarzeniu czterokulowym z kulką z powłoką węglową. W temperaturze 100°C wydłużenie kształtu śladu zużycia wystąpiło w skojarzeniu czterokulowym z kulką z powłoką węglową przy smarowaniu olejem silnikowym 5W40, użytym w badaniach zużycia w T-05 z próbką pierścieniową

Tabela 5.16. Ślad zużycia kulki łożyskowej w styku czterokulowym przy smarowaniu: a) olejem 5W30 zużytym, b) olejem 5W30 nowym, c) olejem 5W40

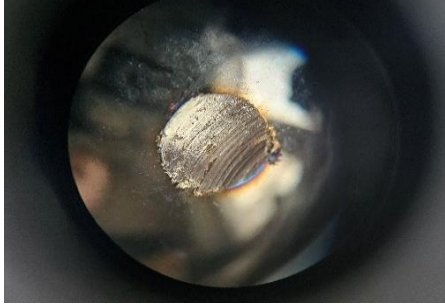

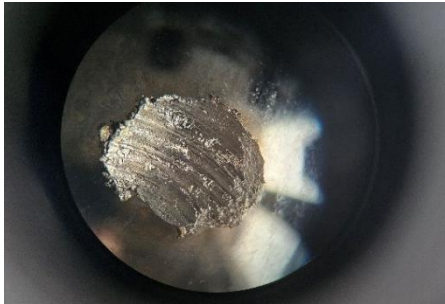
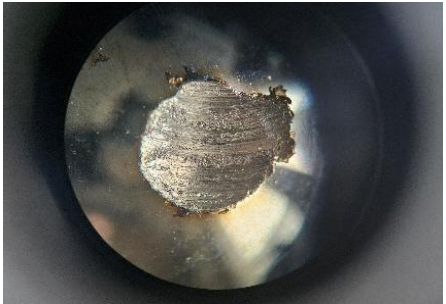

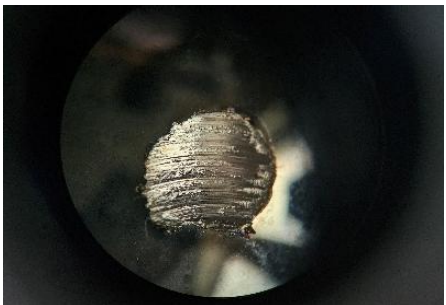
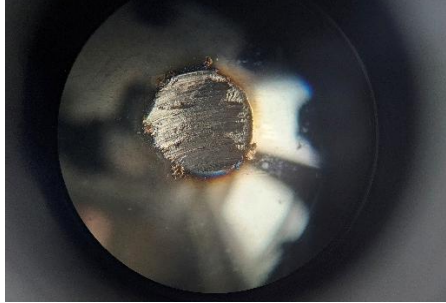
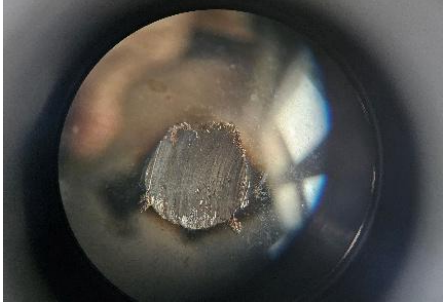
Zestawienie skojarzeń próbki pierścieniowej w T-05 i kulki w T-02		
Powłoka C / stalowa	Ulepszana cieplnie / powłoka C	
Temperatura próby 40°C		
a)		
b)		
c)		
Temperatura próby 100°C		
a)		

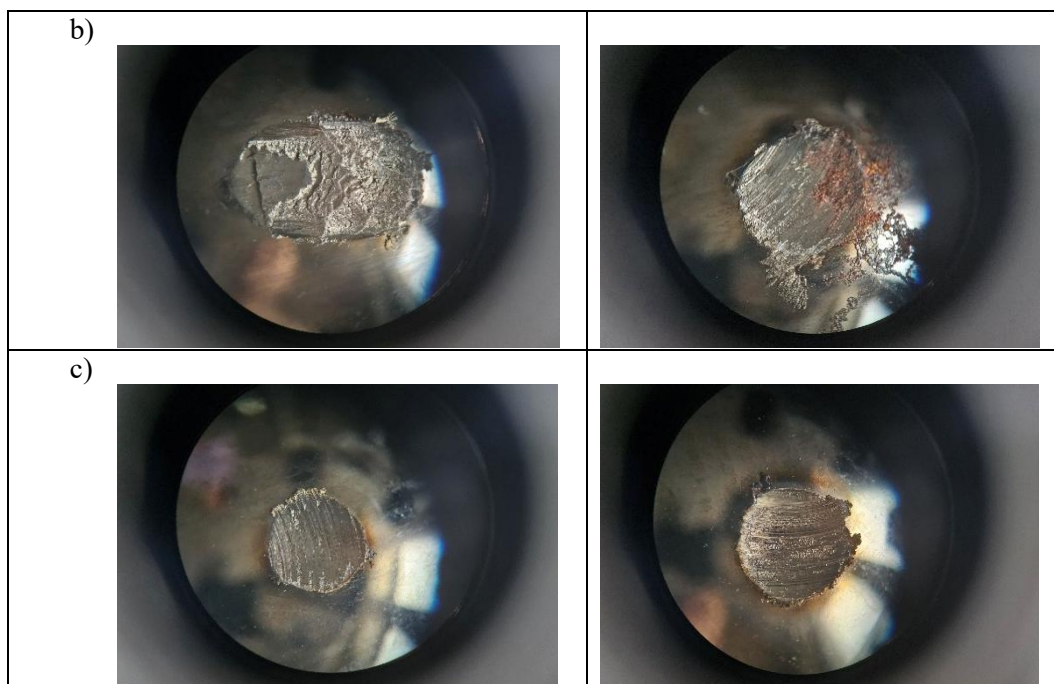


z powłoką węglową. Istotną cechą śladu wytarcia obserwowanego po próbach przeprowadzonych w temperaturze 100°C są przebarwienia termiczne materiału, które głównie obserwuje się przy smarowaniu olejem silnikowym 5W30 zużyтым (tab. 5.16a), oraz charakterystyczne struktury materiałowe świadczące o występowaniu zużycia adhezyjnego i deformacji plastycznej (tab. 5.16b - 5.16c).

Zastosowanie w styku czterokulowym w temperaturze 40 °C kulek stalowych, wykazało znacznie mniejsze deformacje plastyczne w wytarciu kulki. Na kulce stalowej przy smarowaniu olejem silnikowym 5W30 nowym (użyty w badaniach zużycia w T-05 w parze z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie) zaobserwowano rozwarstwienie i nieznaczną deformację oraz nieznaczne przebarwienia termiczne materiału. Natomiast przy zastosowaniu oleju silnikowego 5W30, który użyto do smarowania pary ciernej z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie oraz próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W w T-05, zaobserwowano w wytarciu kulki przebarwienia termiczne (tab. 5.17a-c). Podwyższenie temperatury badań do 100 °C, spowodowało na kulce stalowej przy smarowaniu olejem silnikowym 5W30 nowym (użyty w badaniach zużycia z próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W oraz z próbką ulepszaną cieplnie) na powierzchni próbki rozległe ślady zużycia w postaci nieregularnych bruzd, lokalnych rozwarstwień materiału oraz ziarnistą strukturę powierzchni wskazującą na zużycie adhezyjne. Obserwuje się również deformację plastyczną materiału oraz miejscowe mikropęknięcia, mogące wskazywać na uplastycznienie powierzchni pod wpływem obciążenia i tarcia.

Tabela 5.17. Ślad zużycia kulki łożyskowej w styku czterokulowym przy smarowaniu: a) olejem 5W30 zużytym, b) olejem 5W30 nowym, c) olejem 5W40

Zestawienie skojarzeń próbki pierścieniowej w T-05 i kulki w T-02	
Powłoka C / stalowa	Ulepszana cieplnie / stalowa
Temperatura próby 40 °C	
a) 	
b) 	
c) 	
Temperatura próby 100°C	
a) 	






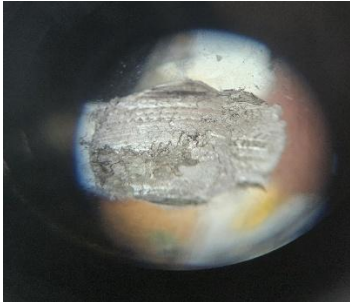
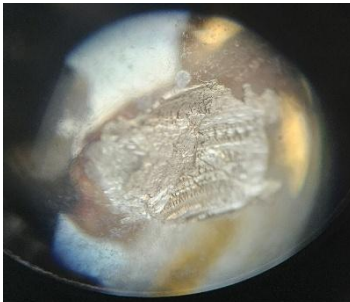
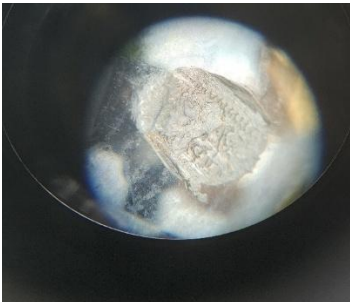
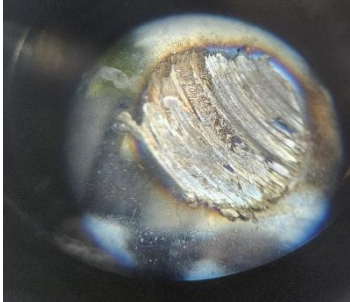
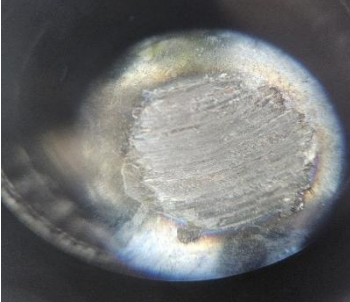
Dodatkowo obserwuje się obszary termicznych przebarwień materiału i nagromadzenia produktów zużycia, co może świadczyć o zużyciu adhezyjnym, deformacji plastycznej oraz lokalnym oddziaływaniu cieplnym w strefie tarcia (tab. 5.17b). W pozostałych przypadkach na powierzchniach kulek widoczny jest stosunkowo równomierny ślad zużycia o owalnym kształcie, z wyraźnymi równoległymi rysami i bruzdami świadczącymi o dominacji zużycia ściernego. W obrębie strefy tarcia obserwuje się również lokalne nagromadzenia materiału i niewielkie deformacje plastyczne, mogące wskazywać na współwystępowanie zużycia adhezyjnego.

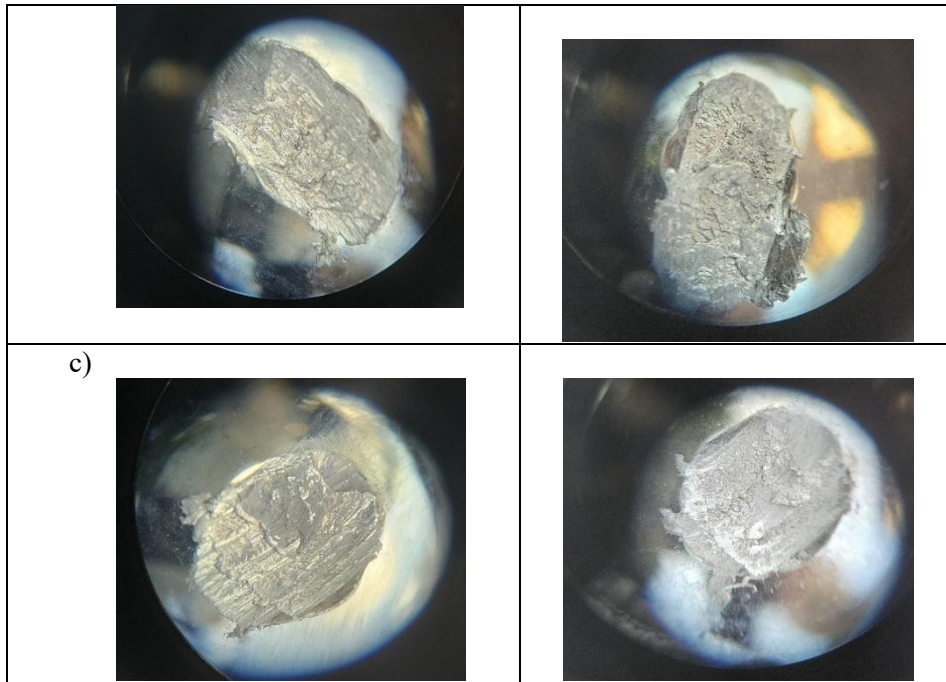
5.3.5. Ocena warstw powierzchniowych skojarzeń ciernych po eksploatacji w styku niekonforemnym

Po przeprowadzeniu badań zużyciowych w testerze T-05 w styku niekonforemnym, zastosowano zużyte oleje do badań właściwości przeciwzatrarciovych olejów w T-02.

Podczas badań przeprowadzonych w temperaturze 40°C zaobserwowano na powierzchni kulek intensywne ślady zużycia w postaci głębokich bruzd, rozległych rozwarstwień materiału oraz nieregularne, ziarniste struktury powierzchni wskazującej na zaawansowane zużycie adhezyjne. W przypadku kulki z powłoką a-C:H:W ze skojarzenia smarowanego olejem silnikowym 5W30 nowym (użyty w T-05 z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W) obserwuje się również deformację plastyczną oraz lokalne wykruszenia materiału, które mogą świadczyć o wysokich naciskach

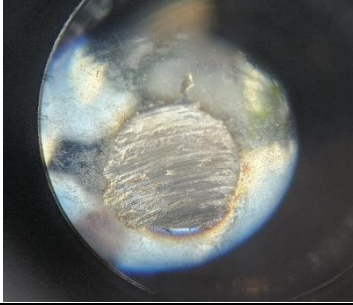

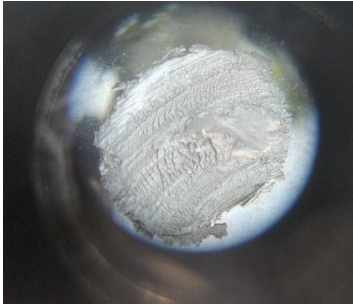


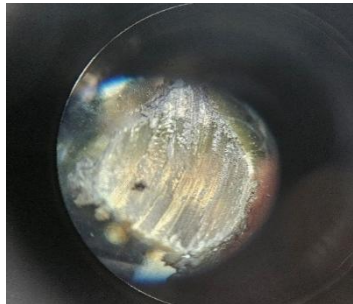

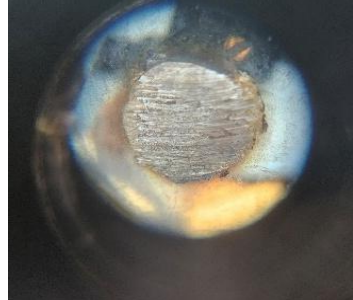
Tabela 5.18. Ślad zużycia kulki łożyskowej w styku czterokulowym przy smarowaniu: a) olejem 5W30 zużyтым, b) olejem 5W30 nowym, c) olejem 5W40

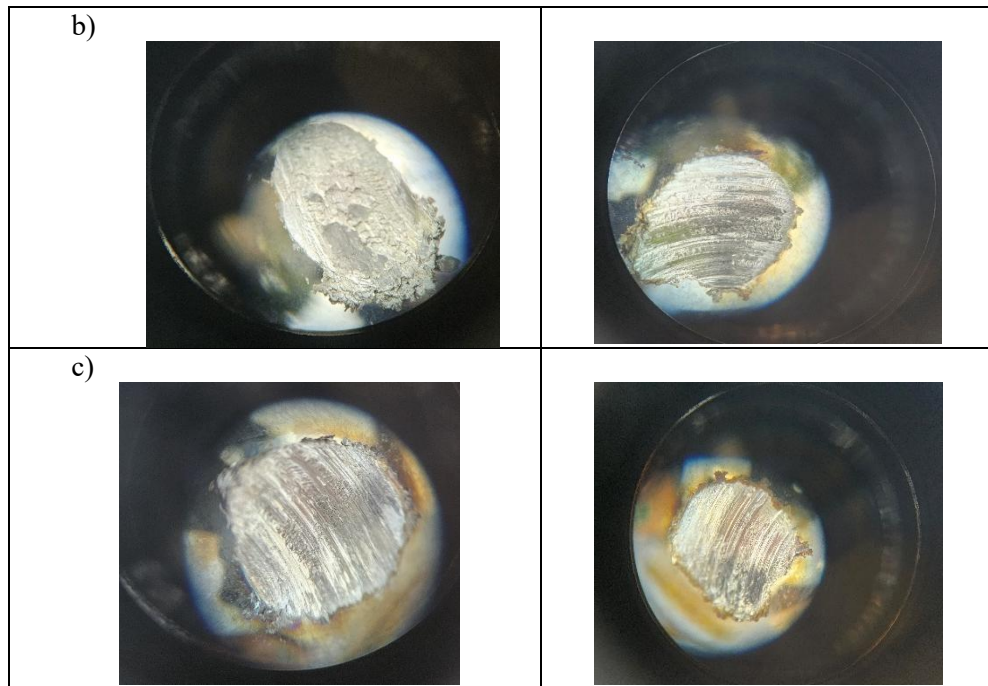
Zestawienie skojarzeń próbki pierścieniowej w T-05 i kulki w T-02	
Powłoka C / powłoka C	Utwardzona powierzchniowo / powłoka C
Temperatura próby 40 °C	
a) 	
b) 	
c) 	
Temperatura próby 100 °C	
a) 	
b)	



kontaktowych i zmęczeniowym charakterze zużycia. Natomiast przy smarowaniu skojarzenia olejem z pary czarnej z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo (komercyjną) zarejestrowano wydłużony kształt wytarcia, który prawdopodobnie jest wynikiem lokalnego uplastycznienia materiału kulki pod wpływem obciążenia i jego przemieszczenia w kierunku ruchu, lub powstawaniem mikropęknięć i rozwarstwień materiału (tab. 5.18b). W temperaturze badań 100 °C, w większości kulek zarejestrowano wyraźny ślad zużycia o wydłużonym kształcie, z dominującymi równoległymi bruzdami i rysami świadczącymi o intensywnym zużyciu ściernym. W strefie zużycia obserwuje się również przebarwienia termiczne oraz lokalne nagromadzenia materiału, co może wskazywać na współwystępowanie zużycia adhezyjnego i deformacji plastycznej pod wpływem podwyższonej temperatury (tab. 5.18a-c). Najistotniejszą różnicę w kształcie śladu zużycia zaobserwowano na kulkach stalowych przy smarowaniu olejem silnikowym 5W30 nowym (użyty w T-05 w parze z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo i z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W) i skojarzeniu z kulką z powłoką węglową, gdzie obserwowano ślady zużycia o dużej powierzchni i nieregularnym kształcie, charakteryzujące się silnym rozwarstwieniem materiału, ziarnistą strukturą powierzchni i miejscami z łuszczeniem się warstwy powierzchniowej. Podwyższenie temperatury do 100°C sprzyjało intensyfikacji deformacji plastycznej i zużyciu adhezyjnemu, czego efektem są lokalne wykruszenia, obecność produktów zużycia oraz możliwe przebarwienia termiczne w strefie tarcia (tab. 5.18b).

Tabela 5.19. Ślad zużycia kulki łożyskowej w styku czterokulowym przy smarowaniu: a) olejem 5W30 zużytym, b) olejem 5W30 nowym, c) olejem 5W40

Zestawienie skojarzeń próbki pierścieniowej w T-05 i kulki w T-02	
Powłoka C / stalowa	Utwardzona powierzchniowo / stalowa
Temperatura próby 40 °C	
a) 	
b) 	
c) 	
Temperatura próby 100 °C	
a) 	

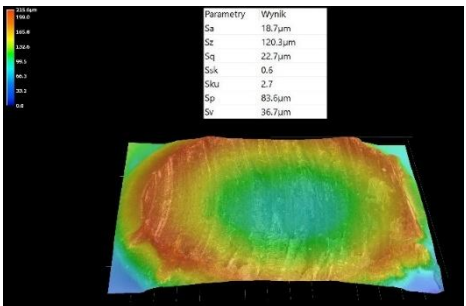
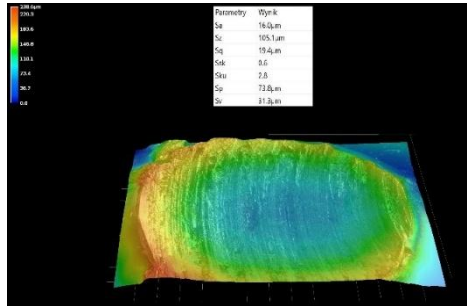


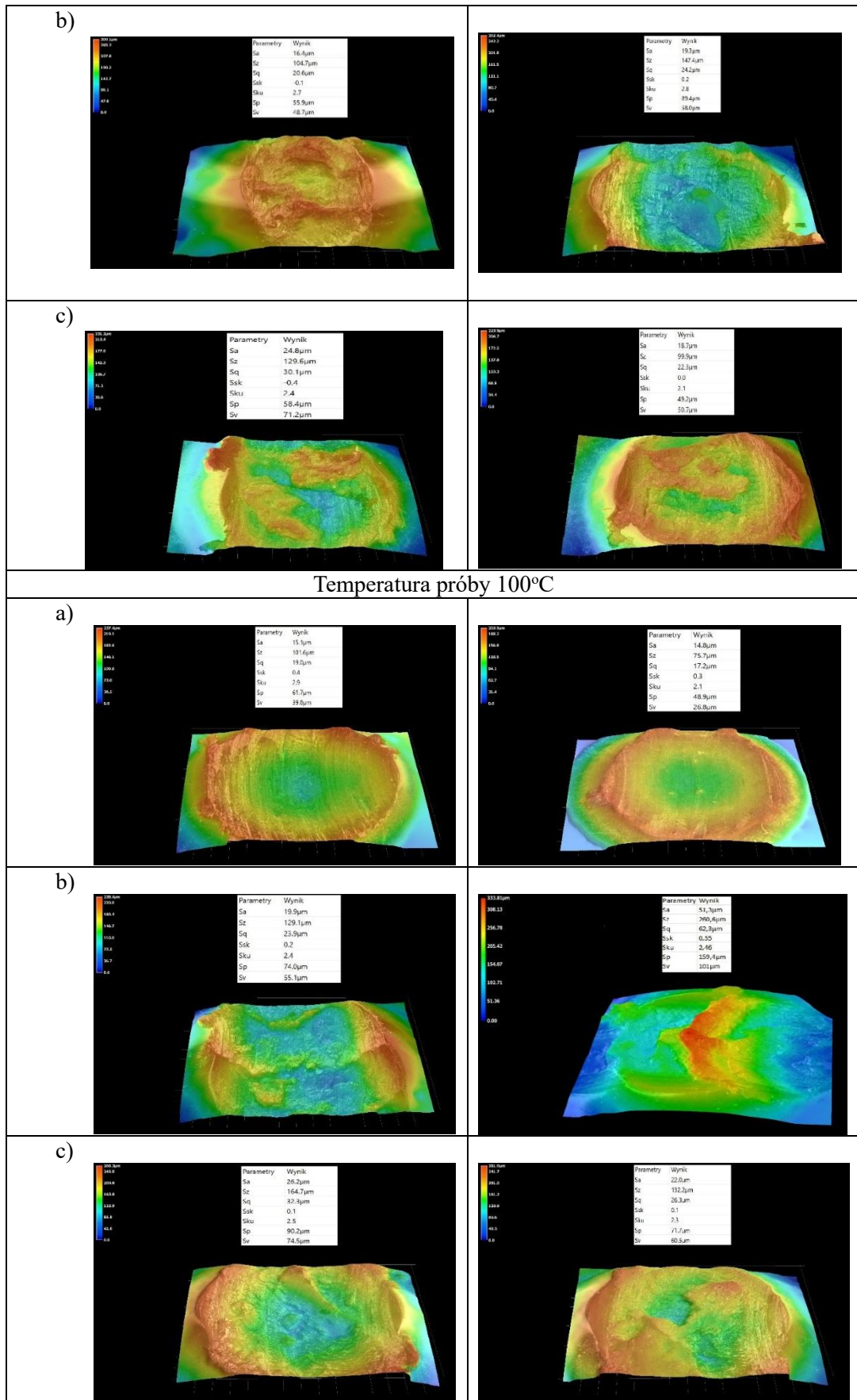
Podczas badań w temperaturze 40 °C, na powierzchniach kulek widoczne są znaczne ślady zużycia o zbliżonym charakterze zmian, obejmujące liczne równoległe bruzdy i rysy zgodne z kierunkiem ruchu, wskazujące na dominujący udział zużycia ściernego. W obrębie stref tarcia obserwuje się także lokalne rozwarstwienia materiału, deformacje plastyczne oraz nieregularne nagromadzenia produktów zużycia na krawędziach śladów, co świadczy o współwystępowaniu zużycia adhezyjnego. Ziarnista struktura warstwy powierzchniowej oraz lokalne obszary łuszczenia mogą świadczyć o rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych związanych z wysokimi naciskami kontaktowymi i cyklicznymi obciążeniami występującymi podczas tarcia [59]. W przypadku zastosowania w skojarzeniu czterokulowym oleju 5W30 zużytego na kulkach obserwowano wyraźne przebarwienia termiczne wokół strefy tarcia, przyjmujące odcienie brunatne i niebieskawe, co może świadczyć o znacznym lokalnym wzroście temperatury podczas procesu zużycia. Obecność tych zmian wskazuje na intensywne tarcie oraz możliwość występowania utleniania powierzchni i degradacji warstwy wierzchniej materiału pod wpływem obciążeń cieplnych i mechanicznych (tab. 5.19a). Po próbach w temperaturze 100 °C na powierzchniach próbek obserwowano ślady intensywnego zużycia w postaci równoległych rys i bruzd zgodnych z kierunkiem ruchu, wskazujących na dominujący charakter zużycia ściernego. W wielu obszarach obserwuje się również rozwarstwienia materiału, deformacje plastyczne oraz lokalne wykruszenia warstwy wierzchniej (tab. 5.19b), wskazujące na współwystępowanie zużycia adhezyjnego i zmęczeniowego. Charakterystycznym elementem są także

przebarwienia termiczne wokół stref tarcia, przyjmujące brunatne i niebieskawe odcienie, które mogą wskazywać na lokalny wzrost temperatury, utlenianie powierzchni oraz degradację materiału pod wpływem intensywnych obciążeń cieplno-mechanicznych [18]. Odmienne ślady zużycia względem pozostałych kulek zaobserwowano w przypadku smarowania olejem 5W30 nowym, gdzie widoczny jest wydłużony i asymetryczny kształt śladu zużycia, co może świadczyć o przemieszczeniu materiału w kierunku ruchu na skutek lokalnej deformacji plastycznej oraz nierównomiernego rozkładu nacisków w strefie tarcia.

Wpływ kompozycji materiałowej skojarzenia ciernego na topografię powierzchni śladów zużycia oceniono na podstawie wyników analizy stereometrii i parametrów chropowatości powierzchni uzyskanych metodą profilometrii 3D. Analizie poddano parametry chropowatości powierzchni S_a , S_z , S_q , S_{sk} , S_{ku} , S_p oraz S_v , które umożliwiają określenie rozwinięcia geometrycznego powierzchni, asymetrii rozkładu nierówności oraz charakteru wzniesień i zagłębień powierzchni. Wyniki przedstawiono w postaci trójwymiarowych obrazów topografii śladów zużycia oraz zestawienia wartości parametrów stereometrii dla temperatur badań w skojarzeniu czterokulowym 40°C i 100°C. Analiza chropowatości powierzchni śladów wytarcia na kulkach po badaniach w temperaturze 40 °C wskazuje na wyższe wartości mierzonych parametrów chropowatości S_a , S_z , S_q , S_{sk} , S_{ku} , S_p i S_v na kulce w skojarzeniu czterokulowym z powłoką a-C:H:W i smarowaniu skojarzenia olejem silnikowym 5W30 zużytym oraz olej 5W40 z prób zużycia z pary ciernej z powłoką węglową.

Tabela 5.20. Przestrzenna mapa topografii powierzchni śladu zużycia na kulce z styku czterokulowego przy smarowaniu olejem a) 5W30 zużytym, b) 5W30 nowym, c) 5W40

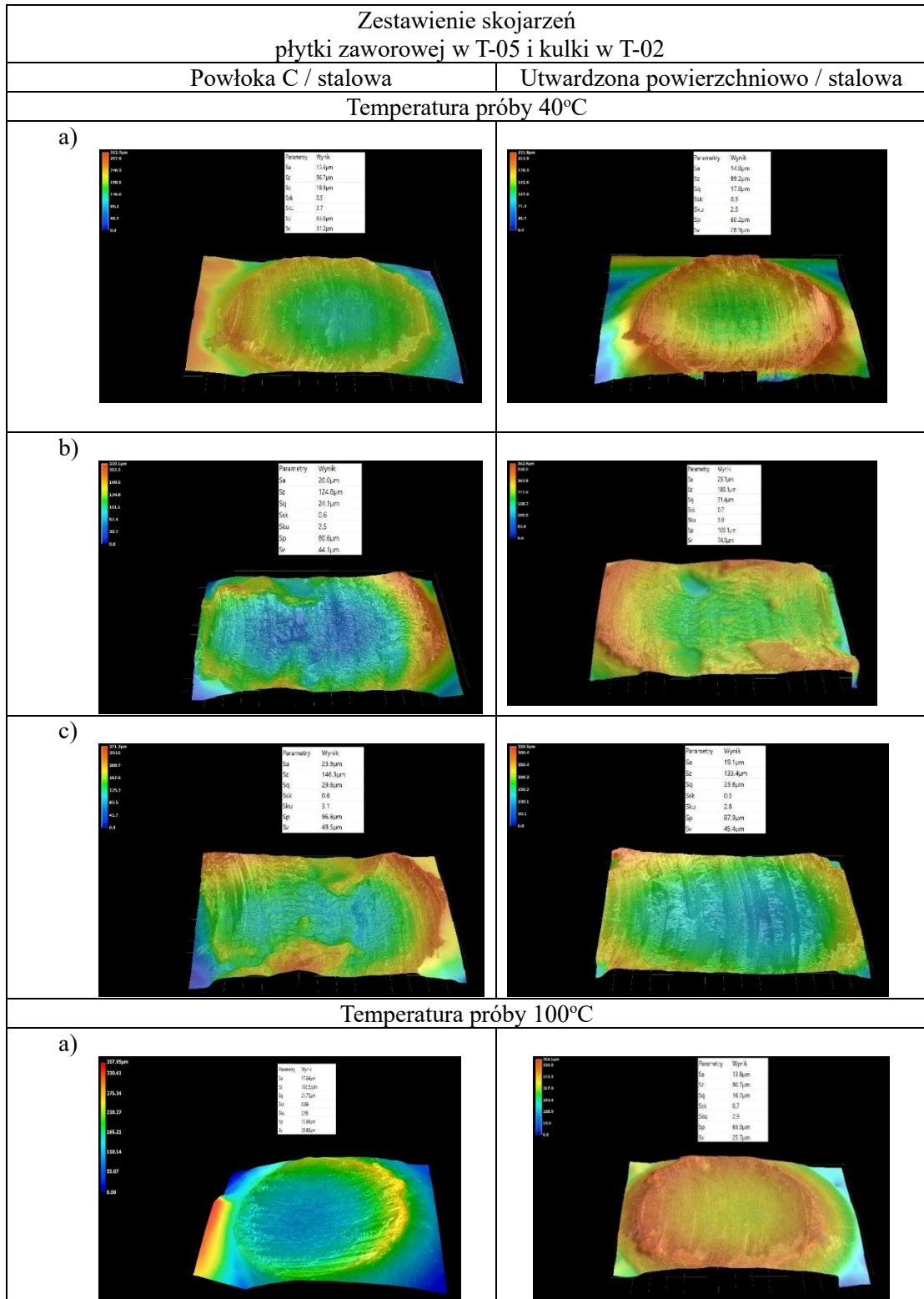
Zestawienie skojarzeń płytki zaworowej w T-05 i kulki w T-02																																	
Powłoka C / powłoka C	Utwardzona powierzchniowo / powłoka C																																
Temperatura próby 40 °C																																	
<p>a)</p>  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Parametry</th> <th>Wynik</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>S_a</td> <td>18.7 μm</td> </tr> <tr> <td>S_z</td> <td>120.3 μm</td> </tr> <tr> <td>S_q</td> <td>22.7 μm</td> </tr> <tr> <td>S_{sk}</td> <td>0.6</td> </tr> <tr> <td>S_{ku}</td> <td>2.7</td> </tr> <tr> <td>S_p</td> <td>83.6 μm</td> </tr> <tr> <td>S_v</td> <td>36.7 μm</td> </tr> </tbody> </table>	Parametry	Wynik	S_a	18.7 μm	S_z	120.3 μm	S_q	22.7 μm	S_{sk}	0.6	S_{ku}	2.7	S_p	83.6 μm	S_v	36.7 μm	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Parametry</th> <th>Wynik</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>S_a</td> <td>16.0 μm</td> </tr> <tr> <td>S_z</td> <td>105.1 μm</td> </tr> <tr> <td>S_q</td> <td>19.4 μm</td> </tr> <tr> <td>S_{sk}</td> <td>0.6</td> </tr> <tr> <td>S_{ku}</td> <td>2.0</td> </tr> <tr> <td>S_p</td> <td>73.8 μm</td> </tr> <tr> <td>S_v</td> <td>27.0 μm</td> </tr> </tbody> </table>	Parametry	Wynik	S_a	16.0 μm	S_z	105.1 μm	S_q	19.4 μm	S_{sk}	0.6	S_{ku}	2.0	S_p	73.8 μm	S_v	27.0 μm
Parametry	Wynik																																
S_a	18.7 μm																																
S_z	120.3 μm																																
S_q	22.7 μm																																
S_{sk}	0.6																																
S_{ku}	2.7																																
S_p	83.6 μm																																
S_v	36.7 μm																																
Parametry	Wynik																																
S_a	16.0 μm																																
S_z	105.1 μm																																
S_q	19.4 μm																																
S_{sk}	0.6																																
S_{ku}	2.0																																
S_p	73.8 μm																																
S_v	27.0 μm																																

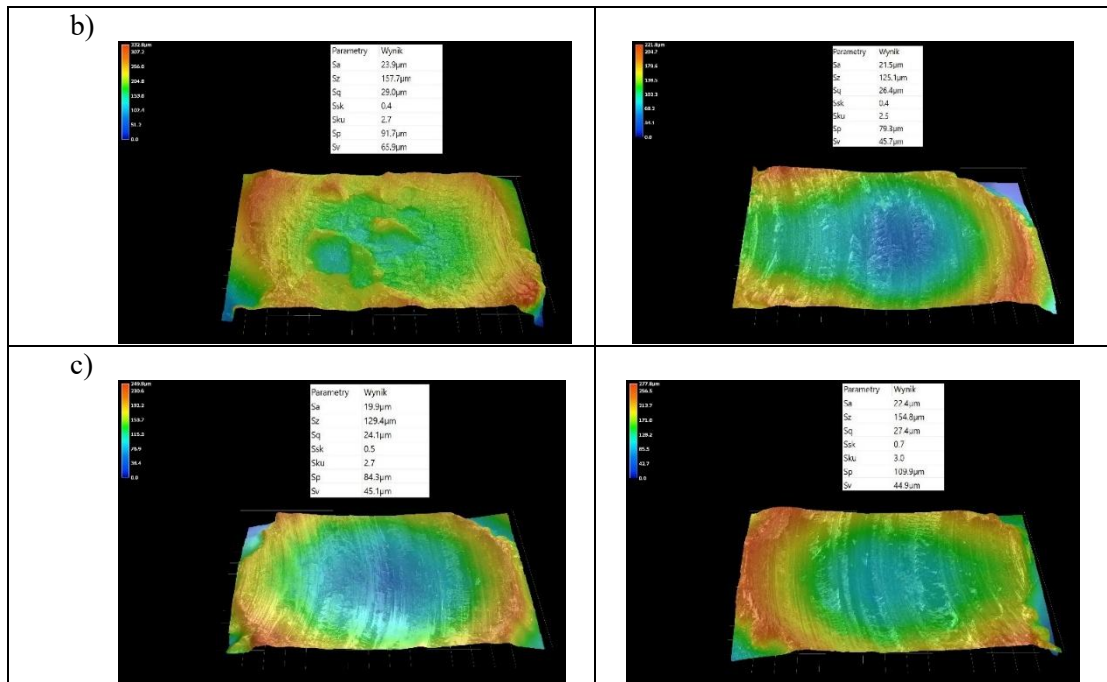


Przy czym wartości parametrów S_{sk} i S_{ku} przy smarowaniu skojarzenia czterokulowego olejem 5W30 zużytym są na podobnym poziomie dla obu badanych olejów z par ciernych w T-05 (płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo oraz płytką zaworową z powłoką węglową) (tab. 5.20). Większe wartości parametrów S_a , S_z i S_q mogą wskazywać na intensyfikację zużycia, większe naciski lokalne i ryzyko występowanie mikrozatarć, zaś wyższe parametry S_p i S_v wskazują na większe naciski lokalne i lepsze własności do akumulacji czynnika smarnego i zanieczyszczeń. W skojarzeniu czterokulowym, w którym zastosowano kulkę z powłoką węglową i smarowano olejem z par ciernych z płytką zaworową z powłoką węglową, parametr chropowatości S_{sk} jest ujemny zarówno przy użyciu oleju silnikowego 5W40 (-0,4), jak i oleju 5W30 nowego (-0,1). Ujemne wartości parametru S_{sk} wskazują na przewagę dolin nad wierzchołkami w profilu powierzchni, co wskazuje na większe zdolności do magazynowania oleju i może przyczyniać się do zmniejszenia tarcia oraz poprawy warunków smarowania. W badaniach w temperaturze 100 °C, w skojarzeniu czterokulowych z kulką z powłoką węglową, przy smarowaniu olejem 5W40 z par ciernych z T-05 z płytką zaworową z powłoką węglową występują wyższe wartości mierzonych parametrów chropowatości w porównaniu do skojarzenia stosującego olej 5W40 współpracujący w T-05 z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo. Jednak zmierzone wartości parametrów chropowatości są niższe niż w badaniach w temperaturze 40 °C przy smarowaniu olejem silnikowym 5W30 zużytym z pary cierniej z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W, natomiast wyższe przy smarowaniu tym samym olejem 5W30 zużytym, jednak współpracującym w T-05 z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo.

Wartości parametrów chropowatości kulek są wyższe przy smarowaniu olejami silnikowymi 5W40 i 5W30 w obu przypadkach olejów smarujących płytki w T-05 (tab. 5.20). Parametr chropowatości S_{sk} na kulkach z skojarzeń czterokulowych miał najbardziej zbliżone wartości, wyjątek dotyczy skojarzenia smarowanego olejem silnikowym 5W30 nowym, który smarował parę cierną z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W, gdzie parametr $S_{sk} = 0,2$ a przy oleju z pary z płytką zaworową komercyjną $S_{sk} = 0,55$. Porównanie wyników parametrów chropowatości uzyskanych w próbach w temperaturach 40°C i 100°C wskazują, że temperatura badań istotnie wpływała na charakter procesów tribologicznych i topografię powierzchni śladów zużycia. W temperaturze 40°C obserwowano zazwyczaj wyższe wartości parametrów S_a , S_z , S_q , S_p oraz S_v , co może świadczyć o bardziej intensywnym przebiegu zużycia i większych lokalnych naciskach kontaktowych. W większości analizowanych przypadków wyższe

Tabela 5.21. Przestrzenna mapa topografii powierzchni śladu zużycia na kulce z styku czterokulowego przy smarowaniu olejem a) 5W30 zużyтым, b) 5W30 nowym, c) 5W40





wartości parametrów stereometrii powierzchni uzyskano dla skojarzeń stosujących olej z par ciernych z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W, jednak ślady zużycia charakteryzowały się bardziej równomierną topografią i mniejszą dominacją lokalnych wzniesień powierzchni. Korzystne właściwości tribologiczne skojarzeń z powłoką a-C:H:W potwierdzają również niższe lub ujemne wartości parametru Ssk, szczególnie dla olejów silnikowych 5W40 oraz 5W30 nowy, co może wskazywać na lepszą zdolność do retencji środka smarnego i stabilizacji filmu olejowego. W temperaturze 100°C ślady zużycia miały zazwyczaj zbliżoną chropowatość powierzchni, a różnice pomiędzy analizowanymi olejami były mniejsze, co może świadczyć o stabilizacji warunków smarowania w podwyższonej temperaturze. Analiza parametrów stereometrii powierzchni śladów zużycia na kulkach w styku czterokulowym po badaniach prowadzonych w temperaturze 40°C, wskazuje na wpływ materiałów płytki zaworowej z pary cierniej z prób zużycia, na topografię powierzchni. W większości przypadków olej z par ciernych z płytkami zaworowymi z powłoką a-C:H:W powodował wzrost wartości parametrów Sa, Sz oraz Sq w porównaniu do oleju z pary cierniej z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo. Trend ten może świadczyć o większym rozwinięciu geometrycznym powierzchni śladu zużycia i korzystniejszych warunkach do kształtowania optymalnej chropowatości powierzchni do warunków tarcia (tab. 5.21). Wyjątek stanowił olej silnikowy 5W30 nowy, gdzie zaobserwowano wzrost wartości parametrów chropowatości przy użyciu oleju z par ciernych w T-05 z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo. W przypadku skojarzenia czterokulowego z kulką stalową

i smarowania olejem 5W30 zużytym różnice pomiędzy chropowatością śladów wytarcia na kulkach były nieznaczne, tylko przy smarowaniu olejem z pary ciernej z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W uzyskano wyższe wartości parametrów amplitudowych (tab. 5.21a). Największe różnice w wartości parametrów chropowatości powierzchni S_a , S_z , S_q , S_p oraz S_v na kulkach obserwowano w skojarzeniach czterokulowych smarowanych olejem silnikowym 5W30 nowym (użyty w parze ciernej z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo) a skojarzenie smarowanym olejem z pary z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W. Może to wskazywać na bardziej intensywny przebieg zużycia adhezyjno-ściernego oraz występowanie lokalnych odkształceń plastycznych powierzchni. Potwierdza to również obraz topografii, na którym widoczne są nieregularne obszary deformacji i nagromadzenia materiału, gdzie dla skojarzenia stosującego olej z pary z płytką z powłoką a-C:H:W ślad zużycia był bardziej jednorodny i równomierny (tab. 5.21b). W badaniach z kulką stalową w styku czterokulowym, z zastosowaniem oleju 5W40, wyższe wartości parametrów stereometrii powierzchni uzyskano dla oleju stosowanego w parze ciernej w T-05 z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W. Szczególnie wyraźny był wzrost parametrów S_a , S_z oraz S_q , a także parametru S_{sk} , co wskazuje na większy udział wzniesień w profilu chropowatości powierzchni. Jednocześnie ślad zużycia na kulce przy smarowaniu olejem z pary ciernej z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W wykazywał większe rozwinięcie topografii powierzchni, natomiast dla oleju z pary ciernej z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo obserwowano bardziej uporządkowaną topografię śladu zużycia, charakteryzującą się regularnym układem nierówności powierzchni (tab. 5.21c). Analiza parametrów stereometrii powierzchni śladów na kulkach po badaniach prowadzonych w temperaturze 100°C wskazują na znaczny wpływ rodzaju zastosowanej płytki zaworowej w badaniach zużyciowych na stanowisku T-05 na ukształtowanie topografii powierzchni. W badaniach w styku czterokulowym z kulką stalową i smarowaniem olejem silnikowym 5W30 zużytym z pary ciernej z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W zmierzono wyższe wartości parametrów S_a , S_z oraz S_q , które wynosiły odpowiednio 17,6 μm , 102,5 μm oraz 21,7 μm , podczas gdy stosowano olej z pary z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo uzyskano odpowiednio 13,8 μm , 90,7 μm i 16,7 μm (tab. 5.21a). Jednocześnie parametr S_{sk} przy smarowaniu olejem 5W30 zużytym z pary ciernej z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W miał niższą wartość (0,16) niż przy smarowaniu olejem z pary ciernej z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo (0,70). Wyniki te wskazują na rozkład wysokości powierzchni bardziej zbliżony

do symetrycznego oraz bardziej równomiernie ukształtowaną topografię powierzchni w obszarze śladu zużycia.

Obserwacje topografii śladu wytarcia wskazują również na większą równomierność śladu zużycia na kulkach, które smarowano olejem silnikowym 5W30 użytym używanym w parach ciernych z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W, podczas gdy stosowany olej z pary z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo wykazał wyraźniejsze lokalne spiętrzenia materiału. W przypadku zastosowania w badaniach oleju silnikowego 5W30 nowego, również stwierdzono wyższe wartości większości parametrów stereometrii przy smarowaniu olejem z par ciernych z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W. Parametry S_a , S_z oraz S_q osiągnęły odpowiednio 23,9 μm , 157,7 μm oraz 29,0 μm , natomiast przy zastosowaniu oleju z par ciernych z płytką utwardzoną powierzchniowo wynosiły odpowiednio 21,5 μm , 125,1 μm oraz 26,4 μm . Parametr S_{sk} był jednakowy dla obu olejów i wynosił 0,4, co może świadczyć o podobnym charakterze zużycia powierzchni (tab. 5.21b). Odmienny trend zmian obserwowano na kulkach, które smarowano w skojarzeniu czterokulowym olejem silnikowym 5W40, gdzie wyższe wartości parametrów chropowatości powierzchni S_a , S_z , S_q oraz S_{sk} zmierzono przy smarowaniu olejem z pary czarnej stosującej w T-05 płytkę zaworową utwardzoną powierzchniowo. Parametry te wynosiły odpowiednio 22,4 μm , 154,8 μm , 27,4 μm oraz 0,7, podczas gdy smarowano olejem z pary czarnej z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W uzyskano odpowiednio 19,9 μm , 129,4 μm , 24,1 μm oraz 0,5. Może to wskazywać na większy udział lokalnych deformacji plastycznych oraz bardziej intensywny przebieg zużycia ściernego (tab. 5.21c). Porównując skojarzenia czterokulowe smarowane olejami silnikowymi 5W30 użytym oraz 5W30 nowym można wskazać, że wyższe wartości parametrów chropowatości powierzchni kulki uzyskano przy smarowaniu olejem z par ciernych z płytkami zaworowych z powłoką a-C:H:W. Natomiast przy smarowaniu olejem silnikowym 5W40 wyższe wartości parametrów S_a , S_z , S_q oraz S_{sk} odnotowano przy zastosowaniu oleju z par ciernych z płytkami zaworowych utwardzonych powierzchniowo, co może wskazywać na bardziej intensywny przebieg zużycia ściernego w tym skojarzeniu czterokulowym. Analiza obrazów topografii wskazuje również na bardziej rozwinięte strefy brzegowe śladu zużycia przy smarowaniu olejem z par ciernych z płytki utwardzanej powierzchniowo. Porównując wyniki uzyskane w temperaturach 40°C i 100°C można stwierdzić, że wzrost temperatury prowadził zazwyczaj do zmniejszenia różnic pomiędzy badanymi skojarzeniami ciernymi oraz bardziej równomierny rozkład śladów zużycia.

W temperaturze 40°C częściej obserwowano większą nieregularność topografii oraz wyraźniejsze lokalne deformacje powierzchni, szczególnie przy smarowaniu olejami używanymi w badaniach zużyciowych w T-05 w parach z płytkami zaworowymi utwardzonymi powierzchniowo.

6. INTERPRETACJA ORAZ PODSUMOWANIE BADAŃ

Rozprawa doktorska przedstawia porównawcze badania tribologiczne smarowanych par ciernych z elementami konstrukcyjnymi z ukształtowanymi warstwami powierzchniowymi w wyniku procesów technologicznych (utwardzanie powierzchniowe, ulepszone cieplnie, metoda PVD - powłoka węglowa a-C:H:W). Do smarowania obszaru styku par ciernych stosowano oleje silnikowe o klasie lepkości 5W30 (w stanie nowym oraz po eksploatacji w silniku spalinowym) i 5W40 (w stanie nowym). Podstawowymi parametrami rejestrowanymi podczas prób stanowiskowych były temperatura w obszarze styku pary ciernej, siła tarcia, zużycie liniowe i masowe przy zadanych wielkościach obciążenia węzła tarcia jak siła nacisku, nacisk jednostkowy, prędkość ślizgania i czas trwania próby. Badania tribologiczne par ciernych przeprowadzono w styku konforemnym i niekonforemnym. Procesy badawcze pozwoliły również na wyznaczenie właściwości przeciwzatarciowych olejów silnikowych stosowanych do smarowania badanych par ciernych, określenie zmian struktury geometrycznej warstw powierzchniowych elementów par ciernych i obserwacje mikroskopową obszarów zużycia w celu oceny wpływu olejów silnikowych na właściwości tribologiczne par ciernych z ukształtowanymi technologicznymi warstwami powierzchniowymi.

Wyniki badań w fazie rozruchu smarowanej pary ciernej ze stykiem konforemnym wykazały istotny wpływ wytworzonej powłoki a-C:H oraz stanu stosowanego oleju silnikowego na opory tarcia. Skojarzenia cierne z próbkami pierścieniowymi pokrytymi powłoką a-C:H charakteryzowały się wyraźnie wyższymi oporami tarcia w porównaniu do skojarzeń z próbkami ulepszanymi cieplnie. Przy nacisku jednostkowym 10 MPa moment rozruchowy tarcia w parze ciernej smarowanej olejem 5W30 zużytym i próbką z powłoką węglową był wyższy o około 191% w porównaniu do analogicznego skojarzenia z próbką ulepszaną cieplnie. Dla oleju 5W30 nowego różnica wyniosła około 93%, natomiast dla oleju 5W40 około 84%. Podobną tendencję zaobserwowano przy wyższych naciskach jednostkowych, gdzie różnice pomiędzy skojarzeniami z próbkami pokrytymi powłoką a-C:H:W i ulepszanymi cieplnie przekraczały 100% dla najwyższych wartości nacisków jednostkowych (rys. 5.1, tab. 5.1). Zastosowanie oleju 5W40 powodowało obniżenie momentu rozruchowego w stosunku do oleju 5W30, zarówno nowego, jak i zużytego. W skojarzeniach z próbkami pierścieniowymi ulepszanymi cieplnie przy nacisku jednostkowym 20 MPa różnica momentu rozruchowego przy smarowaniu olejem 5W40 wyniosła około 64% w porównaniu do skojarzeń

smarowanych olejem 5W30 zużyтым (1,29 Nm a 2,12 Nm, tab. 5.1). Istotne różnice zaobserwowano również w wartościach maksymalnego momentu rozruchowego, który w parach ciernych z próbkami pokrytymi powłoką a-C:H:W i smarowanych olejem 5W30 zużyтым osiągał najwyższe wartości. Przy nacisku jednostkowym 20 MPa moment rozruchowy w tym skojarzeniu był większy o około 114% w porównaniu do pary cierniej z próbką ulepszaną cieplnie. Analogicznie, przy smarowaniu pary cierniej olejem 5W30 nowym różnica ta wyniosła około 116%, natomiast przy smarowaniu olejem 5W40 około 136%. Można zatem stwierdzić, że zastosowanie próbek pierścieniowych ulepszanych cieplnie oraz oleju 5W40 umożliwia ograniczenie momentu rozruchowego, szczególnie przy wyższych naciskach jednostkowych. Różnice te potwierdzają wpływ zarówno właściwości warstwy powierzchniowej, jak i stanu eksploatacyjnego oleju na opory tarcia w początkowej fazie pracy smarowanego węzła tarcia. Zaobserwowany wpływ rodzaju skojarzenia materiałowego i środka smarującego na opory tarcia jest zgodny z danymi literaturowymi, w których wykazano istotną rolę interakcji pomiędzy powłokami DLC a olejem smarującym w warunkach tarcia granicznego i mieszanego [82, 102]. Wyniki badań tribologicznych powłok WC/C typu DLC wykazały, że warunki środowiskowe, w tym wilgotność i temperatura, istotnie wpływają na przebieg procesów tribochemicznych oraz formowanie warstw powierzchniowych, co bezpośrednio przekłada się na zmiany oporów tarcia i intensywności zużycia [85]. W literaturze podkreśla się również, że efekty tribologiczne powłok DLC zależą nie tylko od ich składu chemicznego, lecz również od właściwości fizykochemicznych środka smarującego i warunków obciążenia [20, 82, 102].

Analiza zmian przebiegów współczynnika tarcia w początkowej fazie badań wykazała znacznie wyższe wartości tego parametru w skojarzeniach ciernych z próbkami pokrytymi powłoką węglową a-C:H w porównaniu do skojarzeń z próbkami ulepszanymi cieplnie. Przy nacisku jednostkowym 10 MPa współczynnik tarcia na początku badania w parze cierniej smarowanej zużyтым olejem silnikowym 5W30 był wyższy o około 273% (0,149 wobec 0,04). Analogicznie, dla nowego oleju silnikowego 5W30 różnica wyniosła około 273% (0,112 wobec 0,03), natomiast dla oleju silnikowego 5W40 wyniosła około 114% (0,09 wobec 0,042).

Podobne zależności zaobserwowano przy nacisku jednostkowym 15 MPa, gdzie początkowe wartości współczynnika tarcia w skojarzeniach z powłoką węglową były wyższe odpowiednio o 195% przy stosowaniu oleju 5W30 zużytego, o 218% oleju 5W30 nowego i o 197% oleju 5W40. Przebiegi współczynnika tarcia w skojarzeniach

z próbkami ulepszanymi cieplnie częściej wykazywał tendencję wzrostu oporów tarcia wraz ze wzrostem czasu próby, natomiast w skojarzenia próbkami z powłoką węglową występowała stabilizacja lub zmniejszanie się oporów tarcia (rys. 5.3). W publikowanych badaniach dotyczących powłoki a-C:H stwierdzono, że w początkowej fazie kontaktu w parze cieiernej występują wyższe wartości współczynnika tarcia, które następnie stabilizują się na niskim poziomie w wyniku tworzenia trwałej warstwy granicznej i zachodzących zmian tribochemicznych w warstwach powierzchniowych obszaru styku [14, 85].

Istotne różnice ilościowe obserwuje się w pomiarach zużycia liniowego przeciwpróbek z stopu łożyskowego CuPb30, gdzie w skojarzeniu z powłoką a-C:H:W i smarowaniu olejem 5W40 przy nacisku jednostkowym 10 MPa zużycie liniowe wyniosło 37,9 μm , podczas gdy w analogicznym skojarzeniu z próbką ulepszaną cieplnie jedynie 5,1 μm , (różnica o 643%). Przy nacisku 15 MPa różnica ta zmniejszyła się do około 131% (38,4 μm wobec 16,6 μm), a przy 20 MPa wynosiła około 73% (34,1 μm wobec 19,7 μm). Zużycie liniowe przeciwpróbki podczas smarowania pary olejem 5W30 przy nacisku 10 MPa wyniosło 25,9 μm w skojarzeniu z powłoką węglową, a w skojarzeniu z próbką ulepszaną cieplnie 3,1 μm (różnica 735%). Przy naciskach jednostkowych 15 MPa i 20 MPa wartości te wynosiły odpowiednio 28,1 μm wobec 24,3 μm (różnica 16%) oraz 27,5 μm wobec 17,9 μm (różnica 54%). Natomiast tylko przy smarowaniu pary olejem 5W30 zużytym i nacisku 20 MPa zużycie liniowe w skojarzeniu z próbką ulepszaną cieplnie było większe o około 43% w porównaniu do skojarzenia z powłoką a-C:H:W (13,0 μm wobec 9,1 μm). Zużycie liniowe przeciwpróbek z stopu łożyskowego CuPb30 w zależności od nacisku i skojarzenia materiałowego są zgodne z doniesieniami literaturowymi wskazującymi, że stopy łożyskowe typu CuPb wykazują silną zależność intensywności zużycia od warunków obciążenia, które decyduje o stabilności filmu smarowego, przy czym największe różnice między skojarzeniami występują w warunkach niskiego nacisku, gdy procesy tworzenia warstw granicznych na warstwach powierzchniowych elementów pary zachodzą wolniej [13, 20, 65]. Analiza zużycia masowego przeciwpróbek z CuPb30 potwierdziła również znacznie większą wartość ich zużycia w skojarzeniach z powłoką a-C:H:W.

W skojarzeniu smarowanym olejem 5W30 nowym, przy nacisku 10 MPa ubytek masy w skojarzeniu z powłoką węglową wyniósł 519,1 mg, podczas gdy w skojarzeniu z próbką stalową jedynie 59,4 mg, co odpowiada różnicy rzędu 774%. Przy naciskach 15 MPa i 20 MPa wartości te wynosiły odpowiednio 550,6 mg wobec 174,2 mg (różnica

216%) oraz 587,4 mg wobec 289,7 mg (różnica 103%). Największe różnice zużycia stopu CuPb30 wyznaczono przy smarowaniu obszaru tarcia olejem 5W40 i przy nacisku jednostkowym 10 MPa w skojarzeniu z próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W, gdzie zużycie wagowe wyniosło 526,8 mg, natomiast w skojarzeniu z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie 49,4 mg (zwiększenie wartości zużycia wagowego o 966%). Przy naciskach 15 MPa i 20 MPa zużycie stopu łożyskowego wynosiło odpowiednio 578,5 mg w parze cierniej z próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W przy smarowaniu olejem 5W40, w porównaniu do 229,2 mg w parze cierniej z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie i smarowanej również olejem 5W40 (różnica 152%). Wyniki badań par ciernych z zastosowaniem powłoki a-C:H:W, wykazały większą odporność na procesy zacierania w porównaniu do skojarzeń z próbkami stalowymi AISI 4337. Jednocześnie zastosowanie powłoki a-C:H:W w parze cierniej prowadziło do zwiększenia intensywności zużycia stopu łożyskowego CuPb30, co może być związane z odmiennymi warunkami kontaktu tribologicznego, większą twardością oraz ograniczoną zdolnością do kompensacji odkształceń przez warstwę powierzchniową przeciwpróbki [13, 17, 20, 65].

Analiza parametrów chropowatości powierzchni elementów składowych skojarzeń ciernych po badaniach w styku konforemnym wykazała istotny wpływ nacisku jednostkowego, rodzaju oleju smarującego oraz rodzaju warstwy wierzchniej próbek pierścieniowych na zmiany topografii powierzchni roboczych. W większości analizowanych skojarzeń ciernych odnotowano zmniejszenie wartości parametrów amplitudowych R_a , R_z i R_q próbek pierścieniowych w stosunku do próbek nowych. Jednocześnie wszystkie próbki pierścieniowe wykazały wzrost parametru R_{Sm} , świadczący o zwiększeniu średniego odstępu pomiędzy nierównościami powierzchni, który w skrajnych przypadkach osiągał wartości wyższe nawet o 484% w porównaniu do próbek nowych (tab. 5.3). Amplitudowe parametry chropowatości powierzchni próbek pierścieniowych ulepszanych cieplnie zmniejszały się, np. przy smarowaniu olejem 5W40 parametr R_a zmniejszył się o 76% (z 0,21 do 0,05 μm), a R_z o 74% (z 1,71 do 0,44 μm), przy nacisku jednostkowym 15 MPa. Natomiast warstwa powierzchniowa przeciwpróbek wykazała zarówno przypadki wygładzania warstwy powierzchniowej, jak i lokalne wzrosty mierzonych parametrów chropowatości powierzchni, szczególnie w skojarzeniach smarowanych olejem 5W30 zużytych (tab. 5.4). Wyraźna zmiana w strukturze geometrycznej powierzchni próbek pierścieniowych z powłoką a-C:H:W obserwowano przy naciskach jednostkowych 20 MPa, gdzie w parach ciernych

smarowanych olejem 5W40, parametr Ra wzrósł o 275% (z 0,24 do 0,90 μm), Rz o 152% (z 2,35 do 5,93 μm), a Rq o 232% (z 0,34 do 1,13 μm) (tab. 5.5). Porównanie próbek pierścieniowych ulepszanych cieplnie z próbkami pierścieniowymi z powłoką a-C:H:W wykazało, że próbki z powłoką węglową charakteryzowały się na ogół wyższymi wartościami parametrów amplitudowych Ra, Rz i Rq, zwłaszcza przy wyższych naciskach jednostkowych. Jednocześnie w wielu przypadkach obserwowano niższe wartości parametru RSm dla próbek z powłoką węglową, co może świadczyć o intensywniejszym lokalnym oddziaływaniu mikronierówności w strefie tarcia [100]. Pomiary chropowatości powierzchni wykazały, że wraz ze wzrostem nacisku jednostkowego w obszarze styku następuje przejście od procesów wygładzania warstwy powierzchniowej 10–15 MPa do procesów intensywnego zużycia ściernego 20 MPa, szczególnie w skojarzeniach z próbkami pierścieniowymi z ukształtowaną powłoką a-C:H:W. Stan oleju smarującego w obszarze styku istotnie modyfikuje skalę tych zmian, gdzie olej 5W40 w warunkach wysokich nacisków sprzyjał największemu wzrostowi badanych parametrów chropowatości powierzchni. Przy niskich i średnich naciskach jednostkowych 10–15 MPa powierzchnie pierścieni ulegały wygładzeniu, natomiast przy wyższych naciskach 20 MPa próbki pierścieniowe z powłoką węglową zarejestrowały znaczny wzrost parametrów Ra, Rz, Rq i RSm szczególnie w układach z próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W i olejem silnikowym 5W40 (zmiany względem nowych wartości próbek o 275, 152, 232, 66%), co jest zgodne z literaturą opisującą wpływ rodzaju powłoki i nacisku na parametry chropowatości powierzchni Ra, Rz i Rq w układach smarowanych olejami silnikowymi [86, 90].

Analiza przebiegów momentu tarcia w fazie rozruchu skojarzeń ciernych w styku liniowym wykazała jednoznaczny wpływ siły nacisku, rodzaju oleju smarującego oraz rodzaju ukształtowanej warstwy wierzchniej próbek płytek zaworowych na wartości maksymalnego momentu rozruchowego oraz charakter jego zmian wraz ze wzrostem prędkości ślizgania (rys. 5.7 - 5.8). Przeprowadzone badania wykazały wzrost wartości momentu rozruchowego wraz ze wzrostem siły nacisku w obszarze styku, niezależnie od kompozycji materiałowej skojarzenia ciernego. Przykładowo, w parze cierniej smarowanej olejem 5W30 użytym i płytce zaworowej utwardzonej powierzchniowo moment rozruchowy wzrósł z 2,57 Nm przy 1200 N do 6,01 Nm przy 3000 N, co odpowiada wzrostowi o 134 %. Analogiczny trend wystąpił w skojarzeniu smarowanym olejem 5W40 i płytce zaworowej z powłoką a-C:H:W, gdzie moment zwiększył się z 3,41 Nm do 6,69 Nm, czyli o 96 %. Przy sile nacisku 1200 N najniższe

wartości momentu rozruchowego odnotowano w skojarzeniu smarowanym olejem silnikowym 5W30 zużyтым i z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo (2,57 Nm), natomiast najwyższy w parze cierniej smarowanej olejem 5W40 i z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W (3,41 Nm) (tab. 5.6). Przy sile nacisku 1800 N zmiana momentu rozruchowego zawierał się w przedziale od 3,29 Nm (smarowanie olejem 5W30 nowym i z płytką z powłoką a-C:H:W) do 3,92 Nm (smarowanie olejem 5W30 zużyтым i z płytką z powłoką a-C:H:W). Wzrost siły nacisku do 2400 N spowodował, że najwyższy moment rozruchowy zmierzono w skojarzeniu ciernym smarowanym olejem 5W30 zużyтым i z płytką utwardzoną powierzchniowo (5,61 Nm), natomiast najniższy w parze cierniej smarowanej olejem 5W30 nowym i z płytką z powłoką a-C:H:W (5,11 Nm). Najistotniejsze różnicowanie wartości momentu rozruchowego (37 %) zaobserwowano przy sile nacisku 3000 N, gdzie 4,87 Nm zmierzono w parze cierniej smarowanej olejem 5W40 i z płytką utwardzoną powierzchniowo, a 6,69 Nm w parze cierniej smarowanej olejem 5W40 i z płytką z powłoką a-C:H:W (tab. 5.6). Porównując wpływ ukształtowania technologicznego warstwy powierzchniowej płytek zaworowych, nie stwierdzono jednoznacznej przewagi skojarzeń z płytkami utwardzonymi powierzchniowo lub płytek z powłoką a-C:H:W w całym zakresie obciążeń i stanu oleju smarującego. W porównaniu z pozostałymi badanymi skojarzeniami najwyższe wartości momentu rozruchowego zmierzono w parach ciernych smarowanych olejem silnikowym 5W40 i z płytką zaworową pokrytą powłoką a-C:H:W. Największe wartości momentu rozruchowego dla tego skojarzenia występowały przy wszystkich analizowanych wartościach siły nacisku i wynosiły odpowiednio: 3,41 Nm przy obciążeniu 1200 N, 3,91 Nm przy 1800 N, 5,14 Nm przy 2400 N oraz 6,69 Nm przy 3000 N (rys. 5.8). Podobnie jak w pracach innych badaczy, które wykazały istotny wpływ rodzaju oleju i powłoki DLC na własności tribologiczne, zużycie oraz uszkodzenia powierzchniowe powłok przeciwwzyciowych w warunkach smarowania olejem, także uzyskane w niniejszych badaniach zależności parametrów tarcia i zużycia wykazały istotną zależność od kombinacji materiałów w parze cierniej i warunków tarcia [69, 80, 109].

W styku niekonforemnym par ciernych siła nacisku, stanu oleju smarującego i rodzaju ukształtowanej warstwy wierzchniej płytek zaworowych spowodowały istotne zmiany współczynnika tarcia, wartości sumarycznego zużycia liniowego i temperatury w obszarze styku. W warunkach obciążenia siłą nacisku 1800 N przebiegi współczynnika tarcia dla większości skojarzeń ciernych miały charakter stabilny i po fazie początkowej występowała ich stabilizacja. W tych warunkach najwyższą wartość współczynnika tarcia

odnotowano w parze ciernej smarowanej olejem silnikowym 5W30 zużyтым i z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W (0,11), a najniższą w skojarzeniu smarowanym olejem 5W30 zużyтым i płytce utwardzonej powierzchniowo (0,084) (rys. 5.9a). Po zwiększeniu siły nacisku do 2400 N przebiegi współczynnika tarcia uległ wyraźnej zmianie – pojawiły się lokalne skoki jego wartości, świadczące o mniej stabilnych warunkach tarcia w obszarze styku. Najwyższą wartość współczynnika tarcia zmierzono w parze ciernej smarowanej olejem 5W30 nowym i z płytką utwardzoną powierzchniowo (0,121), natomiast najniższą w skojarzeniu ciemnym smarowanym olejem 5W30 zużyтым i z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W (0,081). W przypadku smarowania olejem 5W40 i zastosowania płytki z powłoką a-C:H:W, współczynnik tarcia wzrósł z 0,101 do 0,108, czyli o 6,9% w porównaniu do płytki zaworowej utwardzonej powierzchniowo (rys. 5.9b). Najwyższa siła nacisku 3000 N spowodowała wystąpienie niekorzystnych warunków pracy pary ciernej z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo i smarowanej olejem 5W30, co doprowadziła do jej zatarcia w 859 s trwania testu. Najwyższy współczynnik tarcia przy tej sile nacisku odnotowano w parze ciernej smarowanej olejem 5W40 i z płytką utwardzoną powierzchniowo (0,112), natomiast najniższy w skojarzeniu smarowanym olejem 5W40 i z płytką z powłoką a-C:H:W (0,091), co oznacza redukcję oporów tarcia w skojarzeniu o 18,8% na korzyść powłoki węglowej (rys. 5.9c). Brak zatarcia analogicznego skojarzenia z zastosowaniem powłoki a-C:H:W potwierdza jej korzystny wpływ na warunki tarcia i odporność na zjawiska adhezyjne (rys. 5.15), co potwierdzają wyniki badań w literaturze [72-74, 81].

Analiza sumarycznego zużycia liniowego wykazała wyraźny wzrost zużycia elementów pary ciernej wraz ze wzrostem siły nacisku w obszarze styku. Największe zużycie zarejestrowano w skojarzeniu smarowanym olejem silnikowym 5W30 nowym i z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo i wyniosło 13,3 μm przy sile nacisku 1800 N, 24,9 μm przy 2400 N oraz 28,5 μm przy 3000 N, co oznacza wzrost o 114% pomiędzy skrajnymi warunkami obciążenia (tab. 5.7). Dla tego samego oleju zastosowanego w parze ciernej z płytką z powłoką a-C:H:W, zużycie było niższe odpowiednio o 45% przy 1800 N (7,3 μm), 1,2% przy 2400 N (24,6 μm) oraz 2,5% przy 3000 N (27,8 μm) (rys. 5.10). Natomiast najniższe zużycie liniowe przy 1800 N odnotowano w skojarzeniu smarowanym olejem 5W30 zużyтым i płytce utwardzonej powierzchniowo 5,8 μm . Przy sile nacisku 3000 N w parze ciernej smarowanej olejem 5W30 zużyтым i z płytką z powłoką a-C:H:W, zużycie wyniosło 11,3 μm , co stanowiło wynik o 32 % niższy w porównaniu do analogicznego skojarzenia z płytką utwardzoną

powierzchniowo, gdzie zarejestrowano wartość 16,6 μm . Wyjątek od korzystnego wpływu powłoki węglowej na zużycie pary ciernej odnotowano przy smarowaniu olejem 5W40 przy sile nacisku 2400 N, gdzie zużycie liniowe pary ciernej wyniosło 13,4 μm i było wyższe o 47% w porównaniu do pary ciernej z płytką utwardzoną powierzchniowo (9,1 μm) (tab. 5.7).

Temperatura w obszarze tarcia zwiększyła się wraz ze wzrostem nacisku jednostkowego, co potwierdza energetyczny charakter procesu tarcia i jest zgodne z doniesieniami literaturowymi, w których wykazano zależności pomiędzy temperaturą, naciskami jednostkowymi oraz intensywnością zużycia w układach tribologicznych [108, 112]. Przy nacisku 1800 N zakres temperatur końcowych w obszarze styku wynosił od 68°C (smarowanie olejem 5W40, płytka z powłoką a-C:H:W) do 77,9°C (smarowanie olejem 5W30 nowym, płytka zaworowa utwardzona powierzchniowo), co oznacza różnicę 9,9°C. W badaniach przy nacisku 2400 N temperatury wzrosły do zakresu 84,5–87,8°C, natomiast przy nacisku 3000 N osiągnęły wartości od 86,2°C do 101,5°C, przy czym najwyższą temperaturę zarejestrowano w parze ciernej smarowanej olejem 5W30 użytym i próbce utwardzonej powierzchniowo, co stanowiło o 15,3°C więcej niż w skojarzeniu smarowanym olejem 5W40 i płytce z powłoką a-C:H:W (rys. 5.11).

Badania w styku niekonforemnym potwierdziły, że wzrost siły nacisku prowadzi do wzrostu współczynnika tarcia, zużycia liniowego i temperatury w obszarze styku, przy czym zastosowanie powłoki a-C:H:W wpływa na zmniejszenie zużycia płytki zaworowej i stabilizuje opory tarcia w porównaniu z układami z warstwami powierzchniowymi utwardzonymi [29, 66, 90]. Podobne zależności wpływu powłok węglowych na poprawę odporności tribologicznej i zmniejszenie zużycia w warunkach obciążeń wykazują badania nad nowoczesnymi powłokami DLC oraz ich mikrostrukturą w układach smarowanych i suchych [53, 90, 93, 101]. Zastosowanie powłoki a-C:H:W w większości przypadków prowadziło do obniżenia zużycia liniowego (o około 30–45%) oraz stabilizacji przebiegów współczynnika tarcia, szczególnie przy wysokich obciążeniach, choć efekt ten był silnie zależny od rodzaju oleju smarującego i warunków pracy pary ciernej (tab. 5.7).

Przeprowadzone obserwacje mikroskopowe warstw powierzchniowych płytek zaworowych po badaniach zużycia w styku liniowym pozwoliły na ocenę charakteru i intensywności zużycia w zależności od siły nacisku, rodzaju i stanu oleju smarującego oraz zastosowanej technologii obróbki próbki. Analizę wykonano na podstawie obrazów mikroskopowych (rys. 5.12–5.16) i wyników ilościowych szerokości śladów zużycia

(tab. 5.8 i rys. 5.17). Szerokość śladów zużycia wzrasta wraz ze wzrostem siły nacisku. Szerokość śladu zużycia na płytkach zaworowych utwardzonych powierzchniowo przy smarowaniu olejem silnikowym 5W30 zużytym wynosiła od 701 μm przy nacisku jednostkowym 1800 N do 859 μm przy nacisku 3000 N, co odpowiada przyrostowi o 158 μm , przy zmianie siły nacisku w badanym zakresie (22%). Analogiczny trend z zastosowaniem płytek zaworowych utwardzonych powierzchniowo wystąpił przy smarowaniu olejem 5W30 nowym (z 672 do 799 μm , wzrost o 127 μm , tj. 19%) oraz przy smarowaniu oleju 5W40 (612 do 736 μm , wzrost o 124 μm , tj. 20%) (tab. 5.8). Porównując wpływ stanu oleju silnikowego na zużycie płytek zaworowych, przy sile nacisku 1800 N, to największy ślad zużycia na płytkach utwardzanych powierzchniowo odnotowano przy smarowaniu olejem 5W30 zużytym (701 μm), olejem 5W30 nowym (672 μm) i olejem 5W40 (612 μm). Natomiast przy sile nacisku 2400 N największy ślad zużycia wystąpił przy smarowaniu pary ciernej olejem 5W30 nowym (757 μm), co oznacza wzrost o 7 μm w stosunku do smarowania olejem zużytym oraz o 15 μm względem smarowania olejem 5W40. Przy najwyższym obciążeniu 3000 N również smarowanie olejem 5W30 zużytym zwiększyło ślad zużycia o 60 μm w porównaniu do smarowania olejem nowym 5W30 oraz o 123 μm przy smarowaniu olejem 5W40. Szerokości śladów zużycia płytki zaworowej z powłoką a-C:H:W były znacznie mniejsze w całym badanym zakresie obciążeń w porównaniu do płytek utwardzonych powierzchniowo. Przy smarowaniu olejem 5W30 zużytym wartości te wynosiły odpowiednio 655 μm (1800 N), 711 μm (2400 N) oraz 724 μm (3000 N), co oznacza wzrost o 69 μm (10%) pomiędzy skrajnymi obciążeniami. Smarowanie olejem 5W30 nowym spowodowało widoczną zmianę – od 552 μm do 680 μm , czyli wzrost o 128 μm (23%), natomiast smarowanie olejem 5W40 od 560 μm do 699 μm , co stanowiło wzrost o 139 μm (25%) (tab. 5.8).

Bezpośrednie porównanie zużycia płytek zaworowych utwardzanych powierzchniowo i płytek zaworowych z powłoką a-C:H:W wykazało korzystny wpływ powłoki węglowej na jego ograniczenie. Największą różnicę zużycia (19%) odnotowano przy smarowaniu olejem silnikowym 5W30 zużytym przy sile nacisku 3000 N. Przy smarowaniu olejem 5W30 nowym redukcja ta wynosiła 17%, natomiast przy oleju 5W40 4% (rys. 5.17). Analiza obrazów mikroskopowych wykazała, że płytki utwardzane powierzchniowo charakteryzowały się licznymi, głębokimi rysami, lokalnymi wykruszeniami oraz intensywnym naruszeniem struktury warstwy wierzchniej, szczególnie przy najwyższych obciążeniach. W przypadku płytek z powłoką a-C:H:W

struktura warstwy powierzchniowej była w większości zachowana, a liczba rys była wyraźnie mniejsza, co wskazuje na korzystniejsze warunki tarcia w obszarze kontaktu liniowego (rys. 5.12–5.14) [17, 66]. Wyniki te są zgodne z opisami procesami zużycia w parach ciernych w literaturze, gdzie zastosowanie powłoki diamentopodobnej wykazuje korzystny wpływ na stabilizację przebiegów tarcia i redukcję zużycia w układach smarowanych olejem [47, 71, 75, 118].

Badania chropowatości powierzchni po próbach zużycia w styku niekonforemnym wykazały istotny wpływ rodzaju warstwy powierzchniowej oraz warunków smarowania na zmiany w strukturze geometrycznej warstw powierzchniowych elementów pary ciernej. Płytki zaworowe z powłoką a-C:H:W charakteryzowały się wyższymi wartościami chropowatości powierzchni niż pary cierne z płytkami zaworowymi utwardzonymi powierzchniowo. Jednak zastosowania oleju 5W30 zużytego w parze cierniej spowodowało, że to większe wartości parametrów zmierzono w parach stosujących płytki zaworowe utwardzone powierzchniowo. Zależność wzrostu parametrów chropowatości powierzchni od wartości siły nacisku była wyraźnie obserwowana przy przejściu od 1800 N do 3000 N. Przy sile 1800 N wartości parametrów chropowatości próbek pierścieniowych R_a i R_q wzrosły odpowiednio o 128 % i 146 % względem wartości parametrów chropowatości nowej próbki, natomiast przy 3000 N o 186 % i 223 %. Jednocześnie parametr R_z zwiększył się z 3,96 μm (przy sile nacisku 1800 N) do 5,58 μm (przy sile nacisku 3000 N), co odpowiadało wzrostowi o 41 %. Natomiast zastosowanie płytek zaworowych z powłoką a-C:H:W ograniczało intensywność zmian parametrów chropowatości powierzchni pierścieni, szczególnie przy niższych obciążeniach. Przy sile 1800 N wartości R_a i R_q wynosiły odpowiednio 0,38 μm i 0,49 μm , podczas gdy stosowano płytki utwardzone powierzchniowo było to 0,48 μm i 0,64 μm . Pomiary płytek z powłoką a-C:H:W przy obciążeniu 3000 N, wykazały spadek parametrów R_a , R_z i R_q odpowiednio o 39 %, 53 % i 41% względem próbek nowych. Wyniki te wskazują, że powłoka a-C:H:W skutecznie stabilizowała proces tarcia oraz ograniczała degradację warstwy wierzchniej w warunkach wysokich obciążeń i smarowania olejem silnikowym 5W30 zużyтым. W parach smarowanych olejem 5W30 nowym i stosujących płytki zaworowe z powłoką węglową przy sile nacisku 3000N odnotowano największe wzrosty parametrów chropowatości pierścieni względem nowych pierścieni, szczególnie R_{Sm} do 116 μm (250 %) oraz R_a do 0,61 μm (190%). W przypadku smarowania olejem 5W40 i zastosowaniu płytek komercyjnych, zmiany były wyraźnie mniejsze i dla pierścieni wartości R_a i R_q wzrosły jedynie odpowiednio do 0,26 μm (większe od nowej

próbki pierścieniowej o 24 %) i 0,35 μm (większe o 35 %), gdy w styku z płytkami pokrytymi powłoką a-C:H:W pierścienie wykazały spadek parametrów Ra do 0,15 μm (-28 %) oraz Rq do 0,22 μm (-15 %). Badania zmian struktury geometrycznej powierzchni elementów pary ciernej wykazały, że największy wpływ na zmianę mierzonych parametrów chropowatości powierzchni miała ukształtowana warstwa powierzchniowa i stan czynnika smarującego, przy czym największe zmiany odnotowano w wartości parametru RSm. Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów można stwierdzić, że podobnie jak w badaniach innych badaczy, zastosowanie powłoki DLC (a-C:H) prowadzi do istotnego obniżenia współczynnika tarcia oraz zwiększenia odporności na zacieranie, co zmniejsza intensywność występowania bezpośredniego kontaktu warstw powierzchniowych co w konsekwencji może ograniczać zmiany parametrów chropowatości powierzchni w trakcie eksploatacji [123].

Badania stanu olejów przeprowadzone w teście jednokropowym pozwoliły na ocenę kondycji zarówno olejów nowych, jak i eksploatowanego oleju 5W30 w silniku spalinowym. Oleje nowe po badaniach zużyciowych, zarówno 5W30, jak i 5W40, nie wykazały obecności zanieczyszczeń ani cieczy obcych, takich jak paliwo czy woda, a ich barwa mieściła się w zakresie świadczącym o pełnej czystości oleju. Olej 5W30 zużyty wykazał w teście wyraźną degradację w porównaniu do stanu początkowego. Analiza oleju po próbach w styku liniowym z płytkami zaworowymi utwardzonymi powierzchniowo, wykazała obecność znaczącej ilości zanieczyszczeń mechanicznych, pochodzących prawdopodobnie z pyłu, opiłków metalicznych i produktów spalania. Ocena zabarwienia oleju wskazuje na pogorszenie jego kondycji i klasyfikuje go w górnej części skali testowej (około 7–8 pozycji w skali od 1 do 9), co sugeruje konieczność wymiany oleju przy takim przebiegu eksploatacyjnym. Zawartość wody była minimalna, natomiast obecność paliwa i płynu chłodniczego nie została stwierdzona. Olej z prób z płytkami zaworowymi z powłoką węglową a-C:H:W wykazuje nieco mniejszą ilość zanieczyszczeń, co może świadczyć o ograniczonym transferze cząstek materiałów z elementów pary ciernej podczas kontaktu tribologicznego. Barwa oleju w tym przypadku była ciemniejsza przy większym obciążeniu, co wskazuje na niewielkie pogorszenie kondycji oleju w porównaniu do oleju 5W30 zużytego z styku z płytkami utwardzonymi powierzchniowo. Wyniki badań własnych potwierdzają obserwacje innych autorów, którzy wykazali, że zmiany stanu oleju w wyniku starzenia i eksploatacji prowadzą do pogorszenia właściwości smarnych i odporności na zatarcie [64, 78]. W przypadku oleju 5W30 po przejechaniu 8000 km zaobserwowano wyraźny spadek

kondycji oleju i obecność zanieczyszczeń mechanicznych, podobnie jak w literaturze, gdzie wykazano, że procesy starzenia i degradacji oleju, zarówno w wyniku eksploatacji, jak i oddziaływania czynników fizykochemicznych prowadzą do zmian jego składu chemicznego, co skutkuje pogorszeniem właściwości smarnych oraz obniżeniem odporności na zatarcie. Dodatkowo obecność produktów degradacji i zanieczyszczeń zwiększa tarcie oraz intensyfikuje zużycie powierzchni współpracujących elementów [2, 45, 62, 110].

Analiza wyników badań przeciwzatarciowych po badaniach zużycia w styku konforemnym w T-05, w styku czterokulowym olejów silnikowych 5W30 zużytego i nowego oraz 5W40 wykazała istotny wpływ rodzaju ukształtowanej warstwy powierzchniowej kulki na parametry przeciwzatarciowe skojarzenia. W przypadku badań oleju 5W30 zużytego wartości obciążenia zacierającego P_t w styku czterokulowym z kulką stalową mieściły się w zakresie 1115–1343 N przy temperaturze 40°C, natomiast zastosowanie powłoki a-C:H:W na kulce skutkowało znaczącym wzrostem odporności na zacieranie, ze wzrostem P_t do wartości 4357–4640 N (tab. 5.12). Analogicznie, obciążenie zatarcia P_t i graniczny nacisk zatarcia p_{oz} wykazały wyraźną poprawę przy zastosowaniu powłoki a-C:H:W, co jednoznacznie wskazuje na podwyższenie nośności filmu smarowego oraz zmniejszenie skłonności do zatarcia. Trend ten utrzymywał się także przy wyższej temperaturze 100°C, gdzie pomimo spadku wartości obciążeń w układach z kulką stalową, powłoka węglowa zachowywała właściwości ochronne, wykazując wyraźną przewagę nad układami bez powłoki. Badania oleju 5W30 nowego i 5W40 potwierdziły analogiczne zależności. Stosowanie powłoki a-C:H:W na kulkach znacząco zwiększało zarówno obciążenia zacierające P_t , jak i graniczny zacisk zatarcia p_{oz} , a wartości granicznego nacisku zatarcia były 2–3-krotnie wyższe w porównaniu do układów z kulkami stalowymi. Podniesienie temperatury z 40°C do 100°C wpływało jedynie w niewielkim stopniu na parametry obciążenia zacierającego, podczas gdy rodzaj powłoki stanowił czynnik decydujący o poprawie odporności tribologicznej badanych układów [11]. Wyniki badań jednoznacznie wskazują, że zastosowanie powłok a-C:H:W w układach ciernych z olejami silnikowymi znacząco zwiększa nośność filmu smarowego, ogranicza zużycie powierzchni i poprawia odporność na zatarcie, jednak warto zaznaczyć, że wpływ na zużycie powierzchni zależy również głównie od geometrii styku oraz warunków smarowania. Efekt ten jest istotny zarówno dla olejów po eksploatacji, jak i nowych, niezależnie od ich klasy lepkości, co potwierdza możliwość stosowania powłok diamentopodobnych w celu poprawy właściwości

przeciwzużyciowych układów tribologicznych w warunkach zmiennych obciążeń i temperatur. Podkreśla się przy tym dominujący wpływ rodzaju powłoki nad klasą lepkości i stanem eksploatacyjnym oleju, co pozostaje w pełnej zgodności z wynikami niniejszych badań [70, 73, 75, 93].

Badania właściwości przeciwzatarciowych olejów po badaniach zużycia w styku niekonforemnym w temperaturze 40 °C wykazały dla oleju silnikowego 5W30 zużytego nie używanego w parze ciernej w T-06 w skojarzeniu czterokulowym z kulką stalową obciążenie zacierającego $P_t = 1342,8$ N, oraz 1098–1051,2 N dla olejów używanych w parach ciernych w T-05 z płytkami zaworowymi utwardzonymi powierzchniowo oraz z płytkami zaworowymi z powłoką węglową. Powłoka a-C:H:W na kulce w skojarzeniu czterokulowym spowodowała wyraźny wzrost odporności na zacieranie, z wartościami P_t w zakresie 3676,8–4357,2 N, co w wybranych przypadkach oznacza wzrost o około 230-250% w stosunku do kulki stalowej (tab. 5.15). Graniczny nacisk zatarcia w tej kompozycji ciernej p_{oz} zwiększył się z 272,2–437,4 N/mm² (kulka stalowa) do 432,4–828,1 N/mm² (kulka z powłoką węglową). W temperaturze 100 °C w skojarzeniu czterokulowym z kulką stalową wartości P_t mieściły się w zakresie 594–711,6 N, natomiast z kulką z powłoką a-C:H:W od 2310 do 3254,4 N (tab. 5.15). W przypadku skojarzenia czterokulowego smarowanego olejem 5W30 użytym (niepoddany badaniom w T-05), różnica obciążenia zacierającego P_t wyniosła około 357% przy użyciu kulki z powłoką a-C:H:W (3250,8 N) w porównaniu do użycia kulki stalowej (711,6 N) (tab 5.15). Graniczny nacisk zatarcia p_{oz} zwiększył się z 254,8–421,5 N/mm² (kulka stalowa) do 317,8–426 N/mm² (kulka z powłoką węglową). Obciążenie zacierające P_t oleju silnikowego 5W30 nowego, wyznaczone w temperaturze 40°C w skojarzeniu czterokulowym z kulką stalową, wyniosło odpowiednio 1891,2 N dla oleju nie używanego w testerze T-05, 1754,4 N dla oleju po badaniach w parze ciernej z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo oraz 1988,4 N dla oleju po badaniach w parze ciernej z płytką zaworową pokrytą powłoką a-C:H:W. Zastosowanie kulki pokrytej powłoką a-C:H:W spowodowało wzrost wartości obciążenia zacierającego P_t odpowiednio do 3084 N, 3984 N oraz 5776,8 N. Graniczny nacisk zatarcia oleju 5W30 nowego z mieścił się w przedziale 195,3 -234,5 N/mm² przy zastosowaniu kulki stalowej w styku czterokulowym oraz osiągnął 380–616,8 N/mm² w przypadku zastosowania kulki pokrytej powłoką węglową a-C:H:W. Po zwiększeniu temperatury do 100 °C obciążenie zacierające P_t dla kulki stalowej w styku czterokulowym zmalało do wartości 1069,2–1288,8 N, podczas gdy w styku czterokulowym zastosowano kulkę z powłoką

a-C:H:W osiągnęło 3464,4–3504 N. Analogiczne wyniki uzyskano dla oleju 5W40. W temperaturze 40 °C w skojarzeniu czterokulowym stosującym kulkę stalową, P_t wynosiło 2224,8–2540,4 N, natomiast dla badań używających kulki z powłoką a-C:H:W 3630–4846,8 N. Graniczny nacisk zatarcia p_{oz} osiągnął wartości 156,3 – 300,5 N/mm² przy zastosowaniu kulki stalowej oraz 579,3–652,2 N/mm² w skojarzeniu czterokulowym z kulką z powłoką węglową, co dowodzi znaczącej poprawy właściwości tribologicznych układu ciernego dzięki zastosowaniu powłoki. W temperaturze 100 °C układy z powłoką a-C:H:W nadal osiągały 2–3-krotnie lepsze parametry niż układy ze stalową kulką, niezależnie od zastosowanego oleju. Uzyskane w tym rozdziale wzrosty obciążenia zacierającego oraz granicznego nacisku zatarcia po zastosowaniu powłoki a-C:H:W są zgodne z trendami opisywanymi w aktualnych badaniach nad powłokami DLC i DLC-Me, w których wykazano kilkukrotną poprawę nośności układu oraz stabilność właściwości tribologicznych w podwyższonej temperaturze i w warunkach smarowania syntetycznym [93, 107].

Przeprowadzona analiza mikroskopowa oraz pomiary stereometryczne powierzchni śladów zużycia wykazały, że zastosowany olej do smarowania obszaru tarcia w skojarzeniu czterokulowym istotnie wpłynął na wybrane parametry chropowatości powierzchni. W większości analizowanych przypadków zastosowanie oleju eksploatowanego wcześniej w parze cierniej z płytką zaworową pokrytą powłoką a-C:H:W prowadziło do istotnego wzrostu wartości parametrów amplitudowych S_a , S_z i S_q w porównaniu z olejem pochodzącym z pary cierniej z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo. Smarowanie skojarzenia olejem 5W30 użytym w temperaturze 100°C spowodowało wzrost wartości parametrów S_a , S_z oraz S_q odpowiednio o około 28%, 13% oraz 30%, co świadczy o wyraźnym wpływie materiału warstwy powierzchniowej płytki zaworowej na topografię powierzchni śladu zużycia (tab. 5.21a). Analiza obrazów mikroskopowych wykazała ponadto, że wzrost temperatury badań do 100°C sprzyjał intensyfikacji procesów zużycia adhezyjnego i deformacji plastycznej, czego przejawem były lokalne rozwarstwienia materiału, przebarwienia termiczne oraz obecność produktów zużycia w strefie tarcia. Jednocześnie w podwyższonej temperaturze obserwowano bardziej jednorodny charakter śladów zużycia oraz zmniejszenie różnic pomiędzy analizowanymi skojarzeniami ciernymi, co może wskazywać na stabilizację warunków smarowania i bardziej stabilny przebieg procesu zużycia. W badaniach w temperaturze 40°C częściej występowały natomiast lokalne deformacje powierzchni, nieregularności w topografii powierzchni oraz wyraźniejsze różnice pomiędzy

poszczególnymi skojarzeniami materiałowymi. Istotnym rezultatem badań jest również spostrzeżenie, że skojarzenia z powłoką a-C:H:W charakteryzowały się korzystniejszym rozkładem nierówności powierzchni. W wielu przypadkach wartości parametru Ssk były niższe lub zbliżone do zera, co wskazuje na bardziej symetryczny charakter topografii oraz większy udział zagłębień powierzchni mogących pełnić funkcję mikrozasobników środka smarnego. Tak ukształtowana powierzchnia może sprzyjać stabilizacji filmu olejowego i ograniczeniu lokalnych koncentracji naprężeń w strefie kontaktu. Uzyskane wyniki potwierdzają, że zastosowanie powłoki a-C:H:W wpływa nie tylko na przebieg procesu zużycia elementów współpracujących, ale również na właściwości tribologiczne oleju po eksploatacji w badanym skojarzeniu ciernym. Analiza topografii śladów zużycia oraz parametrów stereometrii powierzchni wskazuje, że obecność powłoki a-C:H:W sprzyja korzystniejszemu kształtowaniu warstwy wierzchniej, stabilizacji warunków tarcia granicznego oraz ograniczeniu lokalnych zjawisk adhezyjnych. Uzyskane rezultaty potwierdzają zasadność stosowania powłok a-C:H:W w elementach układów rozrządu silników spalinowych, szczególnie w warunkach wysokich obciążeń mechanicznych i cieplnych, gdzie mogą one przyczyniać się do poprawy trwałości eksploatacyjnej oraz właściwości przeciwzużyciowych badanych skojarzeń ciernych.

7. WNIOSKI

WNIOSKI POZNAWCZE

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

1. Zastosowanie powłoki a-C:H:W na elemencie konstrukcyjnym wężła tarcia ze stykiem niekonforemnym wpływało na stabilizację współczynnika tarcia, natomiast w styku konforemnym nie zaobserwowano jednoznacznej tendencji zmian tego parametru. Najniższe wartości momentu rozruchowego uzyskano w wężłach tarcia z elementem ulepszanym cieplnie i smarowanym olejem 5W40, a najwyższe w wężłach z elementem pokrytym powłoką a-C:H:W i smarowanym olejem 5W30 użytym, po eksploatacji w silniku spalinowym.
2. Stwierdzono, że w większości wężłów tarcia z elementem pokrytym powłoką a-C:H:W wystąpiło większe zużycie liniowe stopu łożyskowego CuPb30 niż w wężłach z elementem z warstwą powierzchniową ulepszaną cieplnie. Największa różnica zużycia 643%, wystąpiła przy smarowaniu olejem 5W40 i naciskach jednostkowych 10 MPa. Wyjątek stanowił wężel z elementem ulepszanym cieplnie smarowany olejem 5W30 użytym przy nacisku jednostkowym 20 MPa, gdzie zużycie stopu CuPb30 było o 43% większe. Wyniki zużycia masowego stopu CuPb30 potwierdziły zwiększone jego zużycie w wężłach tarcia z powłoką a-C:H:W. Największą różnicę zużycia masowego stopu, wynoszącą 966%, uzyskano przy smarowaniu olejem 5W40 i nacisku jednostkowym 10 MPa.
3. Zużycie sumaryczne wężła tarcia ze stykiem niekonforemnym wykazało, że zastosowanie powłoki a-C:H:W powoduje w większości badanych skojarzeń materiałowych zmniejszenie zużycia liniowego. Największą różnicę zużycia (15%) odnotowano przy smarowaniu olejem silnikowym 5W30 użytym przy sile nacisku 2400 N. Wyjątek stanowił wężel tarcia smarowany olejem silnikowym 5W40, przy sile nacisku 2400 N, gdzie sumaryczne zużycie liniowe wężła z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W wyniosło 13,4 μm i było o 4,3 μm większe niż wężła z płytką utwardzoną powierzchniowo (9,1 μm).
4. Analiza zmian temperatury w obszarze tarcia wykazała, że powłoka węglowa a-C:H:W powoduje zmniejszenie temperatury w strefie tarcia w porównaniu z warstwami powierzchniowymi ulepszanymi cieplnie, szczególnie przy wyższych

obciążeniach wężła tarcia. Zastosowanie powłoki a-C:H:W zmniejsza różnice temperaturowe między klasą lepkościową i stanem zużycia oleju oraz ogranicza wzrost temperatury nawet przy oleju zużytym. W styku konforemnym najniższe temperatury zmierzono głównie przy smarowaniu olejem 5W30 nowym przy 10 i 15 MPa, a w styku skoncentrowanym z użyciem oleju 5W40 przy maksymalnych naciskach.

5. Dowiedziono, że zużycie płytek zaworowych istotnie zależy od technologicznie wytworzonej warstwy powierzchniowej jak i od rodzaju oraz stanu zużycia oleju silnikowego. Powłoka z amorficznego węgla znacznie ograniczyła zużycie płytki zaworowej w porównaniu z warstwą powierzchniową utwardzoną powierzchniowo na komercyjnej płytce zaworowej. Największą redukcję zużycia o 190 μm (25,1%) obserwowano przy smarowaniu olejem 5W30 nowym przy sile nacisku 2400 N, natomiast najmniejszą o 37 μm (5%) przy smarowaniu olejem 5W40 i sile nacisku 3000 N.
6. Przeprowadzone badania wykazały, że w większości analizowanych węzłach tarcia użycie oleju 5W30 zużytego powodowało wzrost oporów tarcia, temperatury w obszarze tarcia oraz zużycie elementów wężła w porównaniu z węzłami smarowanymi olejem 5W30 nowym. Równocześnie wpływ stanu eksploatacyjnego oleju nie był jednoznaczny i zależał od geometrii styku oraz rodzaju zastosowanej warstwy powierzchniowej. W skojarzeniach z powłoką a-C:H:W olej SAE 5W30 po eksploatacji w silniku spalinowym w wybranych warunkach zapewniał porównywalne, a lokalnie nawet korzystniejsze właściwości tribologiczne niż olej nowy.
7. Wykazano zmniejszenie wysokościowych parametrów chropowatości Ra, Rz i Rq na elementach wężła tarcia po badaniach w styku konforemnym. Zastosowanie w tych węzłach powłoki a-C:H:W ograniczyło zmiany parametrów stereometrycznych na przeciwpróbkach z stopu łożyskowego CuPb30. Największe zmniejszenie tych parametrów zmierzono na pierścieniach pokrytych powłoką a-C:H:W przy smarowaniu olejem 5W30 nowym, a na pierścieniach ulepszanych cieplnie przy smarowaniu olejem 5W40. Zastosowanie powłoki a-C:H:W w styku niekonforemnym ograniczało wzrost chropowatości pierścienia przy smarowaniu olejem 5W30 zużytym. Natomiast wzrost obciążenia powodował wygładzanie powierzchni płytek z powłoką a-C:H:W, co wskazuje na proces docierania współpracujących elementów.

8. Nie stwierdzono jednoznacznej zależności pomiędzy klasą lepkości oleju SAE 5W30 i SAE 5W40, a analizowanymi właściwościami tribologicznymi węzłów tarcia w badanych warunkach. Jednak olej SAE 5W40 wykazał korzystny wpływ na obniżenie oporów tarcia w fazie rozruchu oraz zmniejszenie intensywności zużycia szczególnie w skojarzeniach z elementami pokrytymi powłoką a-C:H:W.
9. Stwierdzono, że temperatura badań (40°C i 100°C), rodzaj oleju silnikowego (SAE 5W30 nowy, SAE 5W30 zużyty oraz SAE 5W40) i rodzaj warstwy powierzchniowej wpływają na wartości obciążenia zacierającego P_t i granicznego nacisku zatarcia p_{oz} . Dominujący wpływ na poprawę właściwości przeciwzatarciowych olejów miało zastosowanie powłoki a-C:H:W. Przy czym stan eksploatacyjny oleju miał większy wpływ na odporność przeciwzatarciową niż sama klasa lepkości. Olej SAE 5W30 zużyty charakteryzował się najniższą odpornością przeciwzatarciową.
10. Analiza mikroskopowa warstwy powierzchniowej oraz pomiary parametrów stereometrycznych elementów węzła ciernego wykazały, że zastosowanie powłoki a-C:H:W ogranicza rozwój lokalnych uszkodzeń powierzchni, pomimo występowania mechanizmów zużycia ściernego i adhezyjnego. Wzrost temperatury w węźle tarcia z 40°C do 100°C powodował intensyfikację procesów zużycia adhezyjnego oraz deformacji plastycznej, jednak obserwowana topografia śladów zużycia wskazywała na bardziej uporządkowany i jednorodny przebieg procesów tribologicznych. Zastosowanie powłoki a-C:H:W sprzyjało stabilizacji warstwy powierzchniowej oraz ograniczało degradację parametrów stereometrycznych powierzchni w warunkach oddziaływań tribologicznych.
11. Wykazano, że właściwości tribologiczne powłoki a-C:H:W są determinowane przez geometrię styku, obciążenie węzła tarcia, temperaturę oraz stan i rodzaj środka smarnego. Uzyskane wyniki wskazują na konieczność kompleksowego projektowania węzłów ciernych z uwzględnieniem warunków eksploatacji oraz kompozycji materiałowej współpracujących elementów.

WNIOSKI UTYLITARNE

W ramach niniejszej pracy doktorskiej, sformułowano następujące wnioski o znaczeniu utylitarnym:

1. Zastosowanie powłok a-C:H:W na elementach konstrukcyjnych węzłów tarcia silników spalinowych umożliwia poprawę ich właściwości tribologicznych,

- takich jak zwiększenie odporności na zacieranie oraz ograniczenie zużycia w warunkach ograniczonego smarowania.
2. Dobór środka smarnego powinien uwzględniać nie tylko klasę lepkości oleju, ale również wyznaczenie optymalnego czasu jego eksploatacji w smarowanej kompozycji materiałowej wężła tarcia.
 3. Zastosowanie oleju SAE 5W40 w badanych węzłach tarcia umożliwia zmniejszenie oporów tarcia i zużycie, szczególnie w układach z powłoką a-C:H:W, co wskazuje na możliwość wykorzystania olejów o wyższej lepkości w warunkach zwiększonych obciążeń.
 4. Wyniki badań wskazują na możliwość wydłużenia trwałości elementów silnika poprzez zastosowanie odpowiednio dobranych par materiałowych: element z powłoką a-C:H:W – stalowy współpracujący element – olej silnikowy.
 5. W praktyce eksploatacyjnej istotne jest monitorowanie stanu oleju silnikowego, ponieważ degradacja środka smarnego może znacząco wpływać na trwałość węzłów tarcia, nawet w przypadku zastosowania nowoczesnych powłok przeciwzużyciowych.
 6. Uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę do projektowania bardziej trwałych i energooszczędnych układów tribologicznych, wykorzystujących powłoki DLC oraz olejów silnikowych o właściwościach dostosowanych do warunków ich pracy.
 7. Wyniki badań mogą zostać wykorzystane przy projektowaniu i optymalizacji układów tribologicznych wykorzystujących powłoki DLC, poprzez odpowiedni dobór geometrii styku, parametrów obciążenia oraz warunków smarowania, co umożliwi zwiększenie trwałości i niezawodności eksploatacyjnej tych układów (zatarcie wężła tarcia z płytką zaworową utwardzoną powierzchniową w styku niekonforemnym przy smarowaniu olejem silnikowym 5W30 i sile nacisku 3000 N).

WNIOSKI ROZWOJOWE

Wyniki uzyskane podczas porównawczych badań stanowiskowych pozwoliły osiągnąć założone cele użytkowe i praktyczne. Jednak złożoność procesów tarcia, zużycia oraz oddziaływań tribochemicznych zachodzących w obecności powłoki a-C:H:W i olejów silnikowych wskazuje na konieczność prowadzenia dalszych badań w celu

pełniejszego poznania mechanizmów kształtowania właściwości tribologicznych badanych węzłów tarcia. Szczególne znaczenie mają następujące kierunki dalszych prac:

- określenie wpływu długotrwałej eksploatacji powłok a-C:H:W w warunkach odwzorowujących rzeczywistą pracę silnika, obejmujących zmienne obciążenia, temperaturę oraz prędkość ślizgania,
- prowadzenie badań właściwości olejów silnikowych w czasie eksploatacji, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu produktów degradacji, zanieczyszczeń i dodatków uszlachetniających na współpracę z powłokami węglowymi,
- zastosowanie do smarowania węzła tarcia innych klas lepkości i rodzajów olejów silnikowych, w tym olejów silnikowych o obniżonej lepkości stosowanych w nowoczesnych jednostkach napędowych,
- prowadzenie badań w warunkach przejściowych, jak rozruch silnika w niskiej temperaturze, chwilowe przeciążenie oraz okresy ograniczonego smarowania,
- zastosowanie metod diagnostyki warstwy powierzchniowej, umożliwiających ocenę zmian topografii, składu chemicznego i struktury warstw powierzchniowych,
- opracowanie modeli prognostycznych trwałości węzłów tarcia z powłokami a-C:H:W, pozwalających przewidywać zużycie elementów w zależności od warunków pracy i stanu środka smarującego.

Realizacja powyższych kierunków pozwoli na lepsze wykorzystanie powłok a-C:H:W w elementach silników spalinowych oraz umożliwi optymalizację doboru par materiałowych i środków smarnych dla zwiększenia trwałości eksploatacyjnej układów tribologicznych.

STRESZCZENIE

Rozprawa doktorska poświęcona jest analizie wpływu powłoki amorficznego węgla a-C:H:W oraz stopnia zużycia syntetycznych olejów silnikowych na właściwości tribologiczne smarowanych węzłów tarcia pracujących w styku konforemnym i niekonforemnym, w warunkach ograniczonego smarowania. Analiza stanu wiedzy obejmuje zagadnienia związane z procesami tarcia i zużycia, charakterystyką olejów silnikowych, metodami kształtowania warstw powierzchniowych oraz właściwościami tribologicznymi powłok na bazie amorficznego węgla, ze szczególnym uwzględnieniem powłok typu a-C:H:W. Program badań obejmował ocenę wpływu powłoki a-C:H:W oraz syntetycznych olejów silnikowych SAE 5W30 (nowego i zużytego) oraz SAE 5W40 na przebieg procesów tribologicznych w parach ciernych pracujących w styku konforemnym i niekonforemnym. Analizowano współczynnik tarcia, moment rozruchowy, temperaturę węzła tarcia, zużycie elementów współpracujących oraz zmiany właściwości geometrycznych warstw powierzchniowych. Uzupełnieniem badań była ocena właściwości przeciwzatarciowych i stopnia degradacji badanych olejów silnikowych oraz analiza chropowatości, stereometrii i topografii warstw powierzchniowych z wykorzystaniem profilometrii oraz mikroskopii optycznej i cyfrowej 3D.

Przeprowadzone badania wykazały, że wpływ powłoki a-C:H:W na właściwości tribologiczne zależy od geometrii styku, obciążenia, temperatury oraz rodzaju i stanu eksploatacyjnego środka smarnego. W styku niekonforemnym zastosowanie powłoki sprzyjało stabilizacji współczynnika tarcia oraz ograniczeniu intensywności zużycia elementów współpracujących. W styku konforemnym nie stwierdzono jednoznacznej tendencji obniżenia oporów tarcia, jednak powłoka wpływała na przebieg procesów zużycia oraz kształtowanie warstwy powierzchniowej. Wykazano również, że zastosowanie oleju silnikowego SAE 5W30 zużytego powodowało wzrost oporów tarcia, temperatury oraz intensywności zużycia w porównaniu z olejem nowym. Badania właściwości przeciwzatarciowych oraz analiza warstw powierzchniowych potwierdziły wpływ warunków eksploatacji i rodzaju skojarzenia materiałowego na przebieg procesów tribologicznych i zużycia. Na podstawie uzyskanych wyników sformułowano wnioski poznawcze i użytkowe oraz wskazano kierunki dalszych badań. Uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę do projektowania i doskonalenia smarowanych węzłów tarcia z wykorzystaniem powłok a-C:H:W oraz syntetycznych olejów silnikowych.

ABSTRACT

This doctoral dissertation is devoted to the analysis of the influence of an a-C:H:W amorphous carbon coating and the degree of degradation of synthetic engine oils on the tribological properties of lubricated friction pairs operating under conformal and non-conformal contact conditions with limited lubrication. The literature review covers issues related to friction and wear processes, the characteristics and classification of engine oils, methods of surface layer engineering, and the tribological properties of amorphous carbon-based coatings, with particular emphasis on a-C:H:W coatings. The experimental programme included an evaluation of the influence of the a-C:H:W coating and synthetic engine oils SAE 5W30 (new and used) and SAE 5W40 (new) on tribological processes occurring in friction pairs operating under conformal and non-conformal contact conditions. The coefficient of friction, starting torque, contact temperature, wear of the mating elements, and changes in the geometric properties of surface layers were analysed. The investigations were supplemented by an assessment of the anti-seizure properties and degradation of the tested engine oils, as well as an analysis of the roughness, stereometric parameters, and surface topography using profilometry together with optical and three-dimensional digital microscopy.

The experimental investigations demonstrated that the influence of the a-C:H:W coating on tribological performance depends on the contact geometry, applied load, temperature, and the type and service condition of the lubricant. Under non-conformal contact conditions, the coating promoted the stabilisation of the coefficient of friction and reduced the wear intensity of the mating elements. Under conformal contact conditions, no unambiguous tendency towards friction reduction was observed; however, the coating affected the wear processes and the development of the surface layer. Furthermore, the use of degraded SAE 5W30 engine oil resulted in increased friction, higher operating temperature, and greater wear intensity compared with new oil. The anti-seizure tests and the analysis of the surface layers confirmed the influence of operating conditions and material pairing on the tribological processes and wear behaviour. Based on the obtained results, scientific and practical conclusions were formulated, and directions for further research were proposed. The obtained results provide a basis for the design and improvement of lubricated friction pairs employing a-C:H:W coatings and synthetic engine oils.

LITERATURA

1. 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
2. Ali A., Ezzat F., El-Gawwad K.A.A., Salem M.: Effect of Lubricant Contaminants on Tribological Characteristics During Boundary Lubrication Reciprocating Sliding, *Minia Journal of Engineering and Technology*, 2013
3. Ambrozik A., Jakóbiec J., Wysopal G.: Basic tendencies in motor lubricants changes., *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, nr 12, s. 51-56, 2011
4. API: API 1509, Engine Oil Licensing and Certification System, 21th Edition, 2022
5. ASTM D 3244-07: Standard Practice for Utilization of Test Data to Determine Conformance with Specifications
6. B.G. Wendler: Functional coatings by PVD or CVD methods, Institute for Sustainable Technologies – National Research Institute (ITeE – PIB), Łódź, Radom, 2011
7. 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*, pp. 508–517, 2004
8. Bąkowski H.: The complete approach to the impact of selected lubricating additives on the tribological properties of engine oils by means of a partial experimental design. *Tribologia 2/2022*, Radom, 2022
9. Beran E.: Wpływ budowy chemicznej bazowych olejów smarowych na ich biodegradowalność i wybrane właściwości eksploatacyjne. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław, 2008
10. 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
11. Bhowmick S., Shirzadian S., Alpas A.T.: High-temperature tribological behavior of Ti containing diamond-like carbon coatings with emphasis on running-in coefficient of friction, *Surface and Coatings Technology*, 2022
12. Burakowski T., Wierzchoń T.: *Inżynieria powierzchni metali*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1995

13. Chen T., Huang Y., Yang L., Zhao S., Li H., Wang F., Zheng Q., Yang S., Sun J.: Tribological behavior in Cu-10Sn alloy fabricated by laser powder bed fusion under oil lubrication, *Materials & Design*, 2026
14. Cherguy, O., Chmielowski, R., Hachem, E. et al.: Deep Learning Prediction of Dry Friction in DLC Coatings Using Literature-Derived Data, *Tribol Lett* 73, 2025
15. Chronowska-Przywara K., Kot M., Szczęch M.: Effect of residual stress on load bearing capacity of PVD coated surfaces. *Tribologia* 4/2018, SIMP, 2018
16. 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, 2021
17. Daszykowski M., Daszykowska S., Lubas J.: Tribological Properties of a-C:H:W Coated Friction Pairs Under Mixed Friction Conditions Using SAE 5W30 Oils. *Tribologia*, 2025
18. Delaney B., Ellini A., Kim J., Zhang M., Nazar N., Daley N., Gonzalez D., Shilati A., Batteas L., Boris E., Antezano N., Shah A., Umakanth S., You P., Al-Hassan Z., Liu S., Wang, Q.: Scuffing: Material Phenomena, Interfacial Effects, and Mitigating Practices. *Tribology Letters*. 74, 2026
19. Dobrzański L., Dobrzańska-Danikiewicz A.: Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich. *Open Access Library*, vol. 5, 2011
20. Donnet C., Erdemir A.: *Tribology of Diamond-Like Carbon Films: Fundamentals and Applications*. Springer, 2008
21. Dziwis R.: Wykorzystanie metod eksperymentalnych i symulacji komputerowych do wyznaczania wybranych własności mechanicznych powłok uzyskiwanych w procesie PVD na spiekanych materiałach narzędziowych, Gliwice, 2023
22. Encyklopedia PWN [dostęp 15.10.2023]
23. Esteve J., Polo M.C., Sanchez G., Diamond and iamond-like carbon films, "Vacuum" 1, 52, s. 133–139, 1999
24. Fidali, M.: *Metody diagnostyki maszyn i urządzeń w predykcynym utrzymaniu ruchu*, Elamed Media Group, Katowice, 2020
25. German VDI 2840 Standards Report, 2006
26. 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, 2013

27. Górny K., Madej M., Stachowiak A.: Evaluation of Wear Resistance in Tungsten-Doped Diamond-like Carbon Coatings (WC/C) on Coated and Uncoated Surfaces Under Starved Oil Lubrication with R452A Refrigerant. *Materials*, 2024
28. 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, s. 15-24, Rzeszów, 2019
29. Hadło K.: Analiza wpływu powłoki a-C:H:W oraz olejów smarowych na procesy tribologiczne w smarowanych wężłach tarcia. Rzeszów, 2022
30. Han J.: Additives for Lubricating Oil and Grease: Mechanism, Properties and Applications, *Lubricants*, vol. 12, no. 7, p. 243, Jul. 2024
31. Hebda M., Janecki M.: Tarcie, smarowanie i zużycie części maszyn. WNT, Warszawa, 1972
32. Hebda M.: Eksploatacja samochodów. Instytut Technologii Eksploatacji, PIB, Radom, 2006
33. 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
34. <https://motorcheckup.com/evaluation/?lang=pl#1618575461901-dc6f0b4f-31a4>
[dostęp na 11.11.2024]
35. <https://olejefuchs.pl/oleje-samochodowe/silnikowe/acea/acea-a3-b3/>
[dostęp na 06.12.2023]
36. <https://oryginalneoleje.pl/Olej-MOPAR-MaxPro-5W-30-5L-p9586?pdf=#>
[dostęp na 19.05.2024]
37. <https://penriteoil.com.au/knowledge-centre/Viscosity/237/what-is-an-sae-viscosity/180> [dostęp na 21.09.2023]
38. <https://sacher-cnc.com/pl/blog/powloki-pvd-dlaczego-warto-o-nich-wiedziec/>
[dostęp na 02.01.2025]
39. <https://utrzymanieruchu.pl/hold-dla-ojca-tribologii-profesora-hansa-petera-josta/>
[dostęp na 17.10.2023]
40. <https://www.acea.auto/> [dostęp na 29.10.2023]
41. <https://www.keyence.com/> [dostęp na 04.01.2026]
42. <https://www.lucasoil.pl/warto-wiedziec/o-olejach-silnikowych>
[dostęp na 11.11.2024]

43. <https://www.moje-auto.pl/blog/porady/oznaczenia-oleju-silnikowego>
[dostęp na 19.10.2023]
44. <https://www.opoltrans.com.pl/upload/userfiles/pliki/oleje.pdf> [dostęp na 19.10.2023]
45. Idzior M., Wichtowska K.: Badanie wpływu przebiegu pojazdów na zmiany właściwości olejów silnikowych. Eksploatacja i testy, Autobusy 6/2016, Poznań, 2016
46. Instrukcja obsługi testera T-05 typu rolka-klocek, ITEe, Radom, 1995
47. 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, 2021
48. Jakóbiec J., Mazanek A., Ambrozik A.: Operational assessment of lubricating oil SL/CFSAE 5W in engine fuelled by diesel oil and biodiesel B10. „Motoryzacyjne skażenie środowiska, s. 48-57, Warszawa, 2009
49. Jaźwiński J., Ważyńska-Fiok K.: Niezawodność systemów technicznych. PWN, Warszawa, 1990
50. Kasina J., Czechowski K., Pofelska-Filip I., Szlosek P., Fedaczyński A., Królicka B.: Wybrane właściwości i wpływ na trwałość ostrzy warstw twardych naniesionych metodą PVD na płytki skrawające z materiałów ceramicznych, Inżynieria Materiałowa 26/, 2005
51. Kałdoński T.J., Juda J., Kałdoński T.: Impact of ionic liquid admixture on electrorheological and tribological properties of a hydrocarbon lubricating oil. Tribologia 4/2023, Radom, 2023
52. Korzekwa J., Skoneczny W.: Właściwości tribologiczne warstwy Al₂O₃ modyfikowanej dwusiarczkiem wolframu we współpracy z tworzywem PEEK/BG, Tribologia, Oficyna Wydawnicza S I M P Press Ltd., no. 4, 2009
53. Kot M., Major Ł., Osada P., Michalczewski R., Lackner J.: Nowoczesne, diamentopodobne powłoki tribologiczne. Jesienna Szkoła Tribologiczna, Zielona Góra, 2024
54. Kot M., Zimowski S., Major Ł., Chronowska-Przywara K., Rakowski W.: Tribologia powłok węglowych w podwyższonej temperaturze. Tribologia, 2015
55. Kowalczyk J., Madej M., Ozimina D.: Evaluation of the effects of ZDDP and Graphene additives in PAO 8 oil on the tribological properties of TIALN coating. Tribologia 2/2023, Radom, 2023

56. Kowalski M., Bernat S., Kowalczyk J., Radoń-Kobus K., Grabowski P., Madej M.: Tribological testing of environmentally friendly lubricants. *Tribologia* 1/2023, Radom, 2023
57. Krasodomski W., Altkom B., Duda A., Szuflita S., Krasodomski M.: Problemy kompatybilności rop naftowych. *Nafta-Gaz*, Kraków, 2020
58. Krawiec S.: Kompozycje smarów plastycznych i stałych w procesie tarcia stalowych węzłów maszyn. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2011
59. Krupa J., Wiązania G., Zimowski S., Kot M.: The influence of the multilayer structure of hardcoatings on their resistance to micro-impact fatigewear. *Tribologia*, 290(2): 37-45, 2020
60. Laber S., Laber A.: Ocena własności smarnych i trybologicznych oleju silnikowego Lotos dynamic, *Tribologia*, zeszyt 3-2015, Zielona Góra, 2015
61. Laber S.: Ocena właściwości trybologicznych powłok uzyskanych drogą metalizacji natryskowej. *Tribologia*, 2012
62. Lawrowski Z.: Technika smarowania. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1996
63. Lawrowski Z.: *Tribologia. Tarcie, zużywanie i smarowanie*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2008
64. Lew, K., Wojewoda, P., Lubas, J.: The analysis of the impact of the storage period of engine and transmission oil on operational properties. *Combustion Engines*, 2025
65. Li H., Cao J.: The tribological properties of bearing alloys under oil lubrication, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2020
66. Lubas J., Hadło K.: Tribological properties of the friction pair with a-C:H coating under the conditions of lubrication with 5W40 biodegradable engine oil. *Tribologia*, Radom, 2022
67. Lubas J.: Własności trybologiczne warstwy wierzchniej stali modyfikowanej borem w warunkach tarcia mieszanego. Instytut Techniki, Uniwersytet Rzeszowski, 2009
68. Lubas J.: Zastosowanie warstw powierzchniowych z borem w smarowanych węzłach ciernych silnika spalinowego, Rzeszów, 2013
69. Ma Z., Zhang G., Chen L., Geng Z., Wang F.: Tribological properties of diamond-like carbon films lubricated with water-emulsified engine oil, *Diamond and Related Materials*, Volume 148, 2024
70. Madej M., Kowalczyk J., Ozimina D.: Właściwości trybologiczne powłok DLC smarowanych cieczą jonową. *Obróbka Metalu*, 2020

71. Madej M., Kowalczyk J., Piotrowska K.: Wpływ parametrów osadzania na właściwości powłok diamentopodobnych ostrzy narzędzi skrawających. *Obróbka Metalu*, Awart Media, Inowrocław, 2023
72. Madej M., Marczevska- Boczkowska K., Ozimina D.: Wpływ wolframu na odporność powłok diamentopodobnych stosowanych w przemyśle chemicznym. *Przemysł Chemiczny*, 2014
73. Madej M., Ozimina D., Pająk M.: Właściwości powłok węglowych uzyskiwanych w procesach fizycznego osadzania z fazy gazowej, *Mechanik* 4/2015, Bydgoszcz, 2015
74. Madej M., Ozimina D.: Właściwości tribologiczne powłok DLC. *Tribologia*, 2012
75. Madej M., Piotrowska K., Ozimina D.: Properties of diamond-like carbon coatings on the titanium alloy Ti13Nb13Zr. *Tribologia* 6/2019, SIMP, 2019
76. Madej M., The effect of TiN and CrN interlayers on the tribological behavior of DLC coatings, *Wear*, 317, 1–2, s. 179–187, 2014
77. Major Ł., Kot M., Major B.: Mikrostrukturalna analiza mechanizmów zużycia powłok mono i wielowarstwowych bazujących na składzie TiN i a-C:H. *Problemy eksploatacji*, 2011
78. Malinowska M., Zera D.: Analiza zmian smarności oleju silnikowego stosowanego w silniku Cegielski-Sulzer 3AL25/30, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*, 2016
79. Matthews A., Franklin S., Holmberg K.: Tribological coating: Contact mechanisms and selection. *J. Phys. Appl. Phys.* 40, 54–63, 2007
80. Michalczewski R., Kalbarczyk M., Łuszcz M., Pieniak D., Skołek E., Nędza J., Wieczorek A.: Surface Fatigue of DLC-Coated Spur Gears. In: Ciulli, E., Ruggiero, A. (eds) *Proceedings of ITS-IFTToMM 2024. ITS-IFTToMM 2024. Mechanisms and Machine Science*. Springer, 2024
81. Michalczewski R., Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszyński W.: Odporność na powierzchniowe zużycie zmęczeniowe kół zębatych pokrytych powłoką WC/C. *Tribologia*, 2011
82. Michalczewski R., Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszyński W.: The lubricant–coating interaction in rolling and sliding contacts. *Tribology International* 42(4), 554–560, 2009

83. Michalczewski R., Piekoszewski W., Tuszyński W., Szczerek M.: The New Methods for Scuffing and Pitting Investigation of Coated Materials for Heavy Loaded, Lubricated Elements. *Tribology - Lubricants and Lubrication*, 2011
84. Monografie Politechniki Lubelskiej, *Tribologia*, Lublin, 2017
85. Montoya V., Macknoja AZ., Mohseni H., Kaspro T., Berman D.: Tribological performance of WC/C-based DLC coatings under high temperature in dry and humid conditions, *Wear*, 2025
86. Musiał J.: Znaczenie topografii powierzchni w transformacji warstwy wierzchniej walcowych par tocznych. Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz, 2014
87. Nachimowicz J., Korbut R.: Kinematyka wężła ciernego na przykładzie łożyskowania igiełkowego, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Transport*, 2014
88. Nosal S.: *Tribologia. Wprowadzenie do zagadnień tarcia, zużywania i smarowania.* Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2012
89. OC Oerlikon Balzers AG: Coated Components. Greater Performance and reliability, 2010
90. Osada P., Kot M., Zimowski S., Wiązania G., Lackner J.: Adaptive DLC coatings with different MoS₂ content. *Tribologia*, 2023
91. Osuch- Słomka E., Michalczewski R., Mańkowska- Snopczyńska A., Gibała M., Wieczorek A., Skołek E.: Influence of Gear Set Loading on Surface Damage Forms for Gear Teeth with DLC Coating. *Coatings* 2025
92. Peng L., Wang L., Qin Z., Zheng H., Shi Z.: Oil-film forming behavior of floating ring bearing under oil-starved lubrication. *Wear*, Volumes 524–525, 2023
93. Piotrowska K., Madej M., Milewski K.: Tribological Properties of DLC Coatings in Model-Based and Real-Life Tests. *Materials*, 2025
94. Piotrowska K., Madej M.: Tribological properties of silver doped titanium nitride coatings. *Tribologia* 3/2023, Radom, 2023
95. Płaza S., Margielewski L., Celichowski G.: *Wstęp do tribologii i tribochemia.* Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 2005
96. PN-EN ISO 683-2:2018-08. Stale do obróbki cieplnej, stale stopowe i stale automatowe - Część 2: Stale stopowe do hartowania i odpuszczania
97. Podniało A.: *Oleje i smary w technice smarowania maszyn i pojazdów samochodowych.* Wydawnictwo RB, Opole, 2012
98. Polański Z.: *Współczesne metody badań doświadczalnych.* PWN, Poznań, 1978

99. Posmyk A.: Tribological properties of piston rings designed for sliding against composite materials in lubricated contacts. *Tribologia* 3/2023, Radom, 2023
100. Puertas-Arbizu I., Salvade-González U., Luis-Pérez C.J.: Study of spacing surface roughness parameters and proposal of a wear behaviour criterion in die-sinking EDM of cobalt-bonded tungsten carbide. *Int J Adv Manuf Technol*, 2025
101. Radoń- Kobus K., Madej M., Kowalczyk J., Piotrowska K.: Properties of Diamond-like Tungsten-Doped Carbon Coatings Lubricated with Cutting Fluid. *Coatings*, 2024
102. Renondeau H., Papke B., Pozebanchukz M., Parthasarathy P.: Tribological properties of DLC coatings in lubricated automotive applications. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part J-journal of Engineering Tribology*, 2009
103. Rickerby D.S., Matthews A.: *Advanced Surface Coatings; Handbook of Surface Engineering*. Chapman and Hall, USA, N.Y., 1991
104. Rutkowska-Gorczyca M., Ptak A., Winnicki M.: Analysis of the tribological properties of Cu-ATiO₂ composite coatings applied by the cold spray method. *Tribologia* 4/2020, Radom, 2020
105. Rynkiewicz A.M., Bojko Ł., Madej T.: Ocena lepkości olejów silnikowych z wykorzystaniem reometru rotacyjnego. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Transport* z. 83, 2014
106. Sacha D., Skibińska A.: *Oceny kompatybilności współczesnych elastomerów ze smarami plastycznymi*. Nafta-Gaz, Kraków, 2023
107. Sadeghi M., Omiya T., Fernandes F., Vilhena L., Ramalho A., Ferreira F.: Tribological Behavior of Doped DLC Coatings in the Presence of Ionic Liquid Additive under Different Lubrication Regimes. *Coatings*, 2023
108. Sadowski J.: 45 lat rozważań o cieplno – mechanicznej interpretacji tarcia i zużycia, część II – interpretacja mikroskopowa procesu tribologicznego. *Tribologia*, 2022
109. Salinas Ruiz, V.R., Kuwahara, T., Galipaud, J. et al.: Interplay of mechanics and chemistry governs wear of diamond-like carbon coatings interacting with ZDDP-additivated lubricants. *Nat Commun* 12, 2021
110. Siwiec E., Grądkowski M.: Eksploatacyjne zmiany właściwości syntetycznego oleju silnikowego, *Tribologia*, 2000
111. Skibińska A., Sacha D.: Oddziaływanie środków smarowych na materiały polimerowe. *Nafta-Gaz* 12/2023, Kraków, 2023

112. Stachowiak G. W., Batchelor A. W.: *Engineering Tribology*. 4th ed. Elsevier, Oxford, 2013
113. Stępień Z.: *Dywersyfikacja zespołów napędowych i paliw – wyzwania dla silnikowych olejów smarowych*. Nafta-Gaz, Kraków, 2024
114. Suchecki A., Śledź J., Brodzik K.: *Zmiana parametrów oleju silnikowego w trakcie próby trwałościowej na hamowni silnikowej*. Napędy i sterowanie, Racibórz, 2022
115. Szczerek M.: *Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych*. ITE, Radom, 1997
116. Szycza M.: *Aspekty transformacji eksploatacyjnej warstwy wierzchniej bieżni łożysk tocznych – przegląd*. *Developments in Mechanical Engineering*. Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz, 2021
117. T-02U. *Aparat czterokulowy – instrukcja obsługi*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji. Radom, 2011
118. Tokar D., Radek N., SĘK P., Mikina A., Kalinowski A.: *Właściwości powłok DLC teksturowanych laserowo*. *Wybrana problematyka w technologiach inżynierii mechanicznej*, Kielce, 2020
119. 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*, 78 p. 107–122, 2019
120. Urzędowska W., Stępień Z.: *Oddziaływanie paliwa na zmiany właściwości użytkowych oleju smarnego w silniku z ZI typu FlexFuel*. *Nafta-Gaz*, 06/2012, Kraków, 2012
121. Velkavrh I., Kalin M., Vižintin J.: *The influence of viscosity on the friction in lubricated DLC contacts at various sliding velocities*. *Tribology International*, 2009
122. Witoś M., Deliś M., Szymański M., Danisiewicz P.: *System diagnostyki tribologicznej i jego rola w utrzymaniu ruchu maszyn i urządzeń*. XIV Konferencja „Teoretyczne i praktyczne aspekty stosowania środków smarnych i eksploatacyjnych w przemyśle”, 22-23.06.2022 Wisła, 2022
123. Woś S., Koszela W., Dzierwa A., Pawlus P.: *Combined Effects of DLC Coating and Surface Texturing on Seizure and Friction in Reciprocating Sliding*. *Lubricants*, 2025
124. Zwierzycki W.: *Płyny eksploatacyjne do środków transportu drogowego: charakterystyka funkcjonalna i ekologiczna*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2006

WYKAZ ZAŁĄCZNIKÓW

Wykaz rysunków

Rysunek 2.1. Podział klas lepkości SAE na zastosowanie wybranej klasy dla danej temperatury [37]	11
Rysunek 2.2. Główne składowe oleju [42]	14
Rysunek 2.3. Zawartość sadzy w olejach [114]	15
Rysunek 2.4. Badania olejów: a) olej 1, b) olej 2, c) olej 3, d) olej 4 [114]	16
Rysunek 2.5. Stosunek zawartości sadzy do wzrostu lepkości [114]	16
Rysunek 2.6. Zawartość żelaza w badanych olejach podczas próby [114]	17
Rysunek 2.7. Obciążenie zacierające oleju silnikowego 5W40 biodegradowalny [66]	17
Rysunek 2.8. Graniczny nacisk zatarcia oleju silnikowego 5W40 biodegradowalny [66]	18
Rysunek 2.9. Kryteria podziału tarcia [62]	19
Rysunek 2.10. Styki płaszczyzn par ciernych; a) styk niekonforemny, b) styk konforemny [49]	20
Rysunek 2.11. Klasyfikacja metod wytwarzania warstw powierzchniowych [12]	21
Rysunek 2.12. Wyniki badań kształtowania się powierzchni roboczej zęba przed i po testach ścierania udarowego AFM [91]	23
Rysunek 2.13. Topografia powierzchni roboczej zęba przed testami ścieralności udarowej [91]	24
Rysunek 2.14. Topografia powierzchni roboczej zęba po testach ścierania udarowego [91]	25
Rysunek 2.15. Typy węgla amorficznego [25]	26
Rysunek 2.16. Klasyfikacja metod i technik osadzania powłok z fazy gazowej PVD i CVD; temperatura powierzchni podłoża T_s , temperatura kinetyczna fazy gazowej T_v , parametr Knudsen Kn [89]	27
Rysunek 2.17. Schemat procesu PVD: 1 - argon, 2 – gaz reaktywny, 3 – źródło materiału powłoki, 4 – elementy pokrywane powłoką, 5 – pompa podciśnienia [89]	28
Rysunek 2.18. Budowa powłoki a-C:H:W [73]	28
Rysunek 2.19. Współczynnik tarcia oraz intensywności zużywania stali oraz powłok podczas użycia środka smarnego PAO-8 [73]	29
Rysunek 2.20. Współczynnik tarcia, intensywności zużywania powłok oraz stali podczas smarowania PAO-8 [73]	30
Rysunek 2.21. Obrazy SEM uszkodzeń po testach korozyjnych dla: a) podłoża oraz b) powłoki TiN/a-C:H:W [73]	30
Rysunek 2.22. Zmiana współczynnika tarcia przy różnym obciążeniu [47]	31

Rysunek 2.23. Moment tarcia par ciernych z czopem bez powłoki oraz z powłoką a-C:H:Si [47].....	31
Rysunek 2.24. Moment tarcia w skojarzeniu ciernym w funkcji czasu trwania próby: a) z próbkami stalowymi, b) z próbkami z powłoką a-C:H:Si [47].....	32
Rysunek 2.25. Moment tarcia podczas rozruchu pary ciernej smarowanej olejem 5W40 biodegradowalny [66]	32
Rysunek 2.26. Współczynnik tarcia w parze ciernej z próbką: a) stalowa, b) z powłoką a-C:H [66].....	33
Rysunek 2.27. Współczynnik tarcia oraz temperatura w parze ciernej w zależności od nacisków jednostkowych [66]	34
Rysunek 2.28. Zużycie wagowe stopu łożyskowego SAE 48 [66]	34
Rysunek 2.29. Średnie wartości zużycia liniowego w naciskach 10N i 50N [101]	36
Rysunek 2.30. Widoki izometryczne i przykłady profili powierzchni po testach tarcia z obciążeniem 50 N dla: a) stali 100Cr6 i b) powłoki a-C:H:W [101].....	36
Rysunek 2.31. Obrazy zużycia optycznego kulek po badaniu z obciążeniem 50 N: a) stal 100Cr6 i b) powłoka a-C:H:W [101].....	37
Rysunek 2.32. Profile przekroju poprzecznego śladu zużycia [27].....	37
Rysunek 2.33. Objętości zużycia próbek po testach [27]	38
Rysunek 2.34. Ślady zużycia powierzchni po testach próbek: a) R452/WCC, b) POE/R452/WCC, c) R452/S235JR, d) POE/R452/S235JR [27]	38
Rysunek 4.1. Elementy badanych par ciernych: a) próbka pierścieniowa, b) przeciwpróbka z stopu łożyskowego CuPb30, c) przeciwpróbka dla badań w styku liniowym (płytki zaworowa) [29]	46
Rysunek 4.2. Tester tribologiczny T-05	47
Rysunek 4.3. Schemat pary kinematycznej: 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 [61].....	48
Rysunek 4.4. Stanowisko badawcze aparat czterokulowy T-02U	49
Rysunek 4.5. Schemat skojarzenia ciernego aparatu czterokulowego: 1) kulka górna, 2) kulki dolne, 3) uchwyt kulki górnej, 4) gniazdo kulek wypełnione badanym olejem, P) obciążenie węzła tarcia, n) prędkość obrotowa silnika [116].....	50
Rysunek 4.6. Zużyta kulka po badaniu w aparacie czterokulowym.....	50
Rysunek 4.7. Mikroskop Delta Discovery 30	50
Rysunek 4.8. Mikroskop Meiji Techno MI7000	51
Rysunek 4.9. Profilometr Taylor Hobson Suftronic 3+	51
Rysunek 4.10. Mikroskop Keyence VHX-7000 [41]	52
Rysunek 4.11. Próbka oleju silnikowego na teście po 24 godzinach od podania kropli	57
Rysunek 4.12. Pierwszy okrąg wewnętrzny testu – cząsteczki w oleju silnikowym [34]	57

Rysunek 4.13. Drugi okrąg testu – kondycja ogólna oleju [34]	58
Rysunek 4.14. Trzeci poszarpany okrąg testu – zawartość wody lub płynu chłodniczego w próbce olejowej [34]	58
Rysunek 4.15. Czwarty okrąg testu – zawartość paliwa w próbce olejowej [34].....	58
Rysunek 4.16. Poszczególne właściwości testu zaznaczone na próbce olejowej: 1) pierwszy okrąg, 2) drugi okrąg, 3) trzeci okrąg	59
Rysunek 4.17. Modelowy przebieg momentu tarcia i obciążenia w funkcji czasu próby na aparacie czterokulowym: 1 – punkt inicjacji zacierania, 2 – punkt zatarcia wężła tarcia, P – obciążenie wężła tarcia, Pt – obciążenie zacierające, Poz – obciążenie zatarcia, Mt – moment tarcia [117].....	60
Rysunek 5.1. Moment rozruchowy w parach ciernych ze stykiem konforemnym smarowanych olejami silnikowymi 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40 w funkcji prędkości ślizgania przy naciskach jednostkowych: a) 5 MPa, b) 10 MPa, c) 15 MPa, d) 20 MPa; (ST- z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie, C- z próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W).....	62
Rysunek 5.2. Moment rozruchowy w parach ciernych smarowanych olejami silnikowymi w funkcji nacisków jednostkowych: a) próbka pierścieniowa ulepszana cieplnie, b) próbka pierścieniowa z powłoką a-C:H:W.....	64
Rysunek 5.3. Współczynnik tarcia w parach ciernych smarowanych olejami silnikowymi 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40 w funkcji czasu przy naciskach jednostkowych a) 10 MPa, b) 15 MPa, c) 20 MPa; (ST- z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie, C- z próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W).....	66
Rysunek 5.4. Temperatura w obszarze styku par ciernych smarowanych olejami silnikowymi 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40 w funkcji czasu przy naciskach jednostkowych a) 10 MPa, b) 15 MPa, c) 20 MPa; (ST- z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie, C- z próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W).....	70
Rysunek 5.5. Zużycie liniowe stopu łożyskowego CuPb30 w funkcji nacisków jednostkowych, przy smarowaniu obszaru tarcia olejami silnikowymi: 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40; (ST- z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie, C- z próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W).....	72
Rysunek 5.6. Zużycie wagowe stopu łożyskowego CuPb30 w funkcji nacisków jednostkowych, przy smarowaniu obszaru tarcia olejami silnikowymi: 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40; (ST- z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie, C- z próbką pierścieniową z powłoką a-C:H:W).....	74
Rysunek 5.7. Moment rozruchowy w parach ciernych smarowanych olejami silnikowymi 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40 w funkcji prędkości ślizgania przy siłach nacisku: a) 1200 N, b) 1800 N, c) 2400 N, d) 3000 N; (ST- z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo, C- z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W).....	81
Rysunek 5.8. Maksymalny moment rozruchowy w parach ciernych smarowanych olejami silnikowymi 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40 w funkcji siły nacisku i stanu oleju silnikowego: a) płytka zaworowa utwardzona powierzchniowo (komercyjna), b) płytka zaworowa z powłoką a-C:H:W	85

Ryunek 5.9. Współczynnik tarcia w parach ciernych ze stykiem niekonforemnym, smarowanych olejami silnikowymi 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40 w funkcji czasu przy siłach nacisku: a) 1800 N, b) 2400 N, c) 3000N; (ST- z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo, C- z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W, * - zatarcie).....	87
Rysunek 5.10. Sumaryczne zużycie liniowe skojarzeń ciernych ze stykiem niekonforemnym, smarowanych olejami silnikowymi 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40 w funkcji siły nacisku: a) 1800 N, b) 2400 N, c) 3000 N; (ST- z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo, C- z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W, * - zatarcie).	89
Rysunek 5.11. Temperatura w obszarze tarcia w styku niekonforemnym smarowanym olejami silnikowymi 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40 w funkcji czasu, w naciskach: a) 1800 N, b) 2400 N, c) 3000 N; (ST- z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo, C- z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W, * - zatarcie)	90
Rysunek 5.12. Ślady wytarcia płytek zaworowych po badaniach zużycia w styku liniowym przy sile nacisku 3000 N, w zależności od oleju smarującego obszar tarcia: a) 5W40, b) 5W30 nowy, c) 5W30 zużyty.....	94
Rysunek 5.13. Ślady wytarcia płytek zaworowych po badaniach zużycia w styku liniowym przy smarowaniu olejem 5W40 w sile nacisku: a) 1800 N, b) 2400 N, c) 3000 N.....	95
Rysunek 5.14. Ślady wytarcia płytek zaworowych po badaniach zużycia w styku liniowym przy smarowaniu olejem silnikowym nowym 5W30 w sile nacisku: a) 1800 N, b) 2400 N, c) 3000 N	96
Rysunek 5.15. Ślady wytarcia płytki zaworowej po badaniach zużycia w styku liniowym dla oleju nowego 5W30, próba zakończona zatarciem.....	97
Rysunek 5.16. Ślady wytarcia płytek zaworowych po badaniach zużycia w styku liniowym przy smarowaniu olejem użytym 5W30 w sile nacisku: a) 1800 N, b) 2400 N, c) 3000 N	98
Rysunek 5.17. Szerokość śladu zużycia płytek zaworowych w parach ciernych smarowanych olejami silnikowymi 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40, przy naciskach: 1800 N, 2400 N, 3000 N; (ST- z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo, C- z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W).....	99
Rysunek 5.18. Stan wizualny obszaru zanieczyszczeń w oknie testu jednokropłowego olejów silnikowych 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40 po próbach zużycia w styku konforemnym w parach ciernych przy sile nacisku 2400 N i 3000 N; (ST- z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo, C- z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W)	109
Rysunek 5.19. Zanieczyszczenie oleju 5W30 użytego po próbach zużycia w parze ciernej z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo przy sile nacisku 2400 N: a) obszar pierwszy, b) obszar drugi, c) obszar trzeci, d) obszar czwarty.....	110
Rysunek 5.20. Zanieczyszczenie oleju 5W30 użytego po próbach zużycia w parze ciernej z płytką zaworową z powłoką węglową przy sile nacisku 2400 N: a) obszar pierwszy, b) obszar drugi, c) obszar trzeci, d) obszar czwarty	110

Rysunek 5.21. Moment tarcia w styku czterokulowym stosujących oleje silnikowe 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40 w funkcji czasu w temperaturze: a) 40 °C, b) 100°C; (ST- z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo, C- z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W)	112
Rysunek 5.22. Właściwości przeciwzatarciowe oleju silnikowego 5W30 zużytego w styku konforemnym w temperaturze 40 °C i 100°C; a) obciążenie zacierające P_t , b) graniczny nacisk zatarcia p_{oz}	114
Rysunek 5.23. Właściwości przeciwzatarciowe oleju 5W30 nowego w temperaturze 40 °C i 100°C; a) obciążenie zacierające P_t , b) graniczny nacisk zatarcia p_{oz}	116
Rysunek 5.24. Właściwości przeciwzatarciowe oleju 5W40 w temperaturze 40 °C i 100°C; a) obciążenie zacierające P_t , b) graniczny nacisk zatarcia p_{oz}	118
Rysunek 5.25. Moment tarcia w styku czterokulowym smarowanym olejami silnikowymi po eksploatacji w styku niekonforemnym 5W30 zużyty, 5W30 nowy, 5W40 w funkcji czasu w temperaturze: a) 40°C, b) 100°C; (ST- z płytką zaworową utwardzoną powierzchniowo, C- z płytką zaworową z powłoką a-C:H:W)	120
Rysunek 5.26. Właściwości przeciwzatarciowe oleju 5W30 zużytego w temperaturze 40 °C i 100°C; a) obciążenie zacierające P_t , b) graniczny nacisk zatarcia p_{oz}	122
Rysunek 5.27. Właściwości przeciwzatarciowe oleju 5W30 nowego w temperaturze 40 °C i 100°C; a) obciążenie zacierające P_t , b) graniczny nacisk zatarcia p_{oz}	124
Rysunek 5.28. Właściwości przeciwzatarciowe oleju 5W40 w temperaturze 40 °C i 100°C; a) obciążenie zacierające P_t , b) graniczny nacisk zatarcia p_{oz}	125

Wykaz tabel

Tabela 2.1. Klasyfikacja olejów bazowych wg ACEA [35].....	11
Tabela 2.2. Klasyfikacja olejów bazowych wg API [9].....	12
Tabela 2.3. Chropowatość próbek pierścieniowych przy nacisku jednostkowym 20 MPa po zakończonym teście [66]	35
Tabela 2.4. Chropowatość przeciwpróbek przy nacisku jednostkowym 20 MPa po zakończonym teście [66]	35
Tabela 4.1. Skład chemiczny próbki 34CrNiMo6 [96].....	46
Tabela 4.2. Parametry powłoki węglowej a-C:H:W	47
Tabela 4.3. Wybrane właściwości stopu łożyskowego CuPb30 [28].....	47
Tabela 4.4. Skład chemiczny przeciwpróbek użytych dla styku liniowego	47
Tabela 4.5 Skład chemiczny stali 100Cr6.....	50
Tabela 5.1. Moment rozruchowy par ciernych ze stykiem rozłożonym [Nm]	63
Tabela 5.2. Siła tarcia, temperatura w obszarze tarcia, zużycie liniowe i zużycie wagowe przeciwpróbek z stopu łożyskowego CUPb30 w parze cierniej ze stykiem rozłożonym.	69

Tabela 5.3. Chropowatość powierzchni elementów par ciernych po badaniach w styku konforemnym przy sile nacisku 10 MPa	76
Tabela 5.4. Chropowatość powierzchni elementów par ciernych po badaniach w styku konforemnym przy sile nacisku 15 MPa	77
Tabela 5.5. Chropowatość powierzchni elementów par ciernych po badaniach w styku konforemnym przy sile nacisku 20 MPa	79
Tabela 5.6. Maksymalny moment rozruchowy skojarzeń ciernych ze stykiem liniowym [Nm].....	84
Tabela 5.7. Siła tarcia, zużycie liniowe i temperatura w obszarze tarcia w styku liniowym	92
Tabela 5.8. Ślad zużycia na płytkach zaworowych w badaniach zużycia w styku liniowym [µm].....	99
Tabela 5.9. Chropowatość powierzchni elementów par ciernych po badaniach w styku niekonforemnym przy sile nacisku 1800 N	101
Tabela 5.10. Chropowatość powierzchni elementów par ciernych po badaniach w styku niekonforemnym przy sile nacisku 2400 N	104
Tabela 5.11. Chropowatość powierzchni elementów par ciernych po badaniach w styku niekonforemnym przy sile nacisku 3000 N	106
Tabela 5.12. Właściwości przeciwwzartarciowe oleju silnikowego 5W30 zużytego po badaniach w styku konforemnym	113
Tabela 5.13. Właściwości przeciwwzartarciowe oleju silnikowego 5W30 nowego po badaniach w styku konforemnym	115
Tabela 5.14. Właściwości przeciwwzartarciowe oleju silnikowego 5W40 po badaniach w styku konforemnym	117
Tabela 5.15. Właściwości przeciwwzartarciowe olejów silnikowych po badaniach w styku niekonforemnym.....	121
Tabela 5.16. Ślad zużycia kulki łożyskowej w styku czterokulowym przy smarowaniu: a) olejem 5W30 zużyтым, b) olejem 5W30 nowym, c) olejem 5W40	127-128
Tabela 5.17. Ślad zużycia kulki łożyskowej w styku czterokulowym przy smarowaniu: a) olejem 5W30 zużyтым, b) olejem 5W30 nowym, c) olejem 5W40	129-130
Tabela 5.18. Ślad zużycia kulki łożyskowej w styku czterokulowym przy smarowaniu: a) olejem 5W30 zużyтым, b) olejem 5W30 nowym, c) olejem 5W40	131-132
Tabela 5.19. Ślad zużycia kulki łożyskowej w styku czterokulowym przy smarowaniu: a) olejem 5W30 zużyтым, b) olejem 5W30 nowym, c) olejem 5W40	133-134
Tabela 5.20. Przestrzenna mapa topografii powierzchni śladu zużycia na kulce z styku czterokulowego przy smarowaniu olejem a) 5W30 zużyтым, b) 5W30 nowym, c) 5W40	135-136
Tabela 5.21. Przestrzenna mapa topografii powierzchni śladu zużycia na kulce z styku czterokulowego przy smarowaniu olejem a) 5W30 zużyтым, b) 5W30 nowym, c) 5W40	138-139