

UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNO-PRZYRODNICZY
im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich
w Bydgoszczy
WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Jarosław Mikołajczyk

**WPLYW DODATKÓW SMAROWYCH
NA INTENSYWNOŚĆ PROCESU ZUŻYWANIA**

Promotor:
prof. dr hab. inż. Michał Styp-
Rekowski

Bydgoszcz 2014r.

SPIS TREŚCI

Symbole i akronimy częściej używane w pracy	4
1. GENEZA I PROBLEMATYKA PRACY	5
2. ANALIZA STANU WIEDZY Z ZAKRESU TEMATYKI PRACY – STUDIUM LITERATUROWE.....	6
2.1. Warstwa wierzchnia	6
2.1.1. Modele warstwy wierzchniej.....	8
2.1.2. Wielkości opisujące stan warstwy wierzchniej.....	10
2.1.2.1. Cechy fizyko-chemiczne warstwy wierzchniej.....	12
2.1.2.2. Cechy struktury geometrycznej powierzchni.....	13
2.2. Rodzaje procesów zużywania tribologicznego.....	24
2.3. Środki smarowe i dodatki uszlachetniające.....	30
2.4. Preparaty eksploatacyjne.....	35
2.4.1. Preparaty o działaniu chemicznym	36
2.4.2. Preparaty z cząsteczkami środków smarowych stałych.....	37
2.4.3. Preparaty umożliwiające smarowania na zasadzie tzw. przenoszenia selektywnego (PS).....	39
3. PODSUMOWANIE STUDIUM LITERATUROWEGO.....	41
3.1. Wnioski z analizy literatury, hipoteza naukowa.....	41
3.2. Cel i zakres pracy.....	42
4. BADANIA WŁASNE.....	43
4.1. Badania wstępne.....	43
4.1.1. Zasada pomiarów.....	43
4.1.2. Warunki i zakres badań.....	44
4.1.3. Wyniki badań.....	44
4.1.4. Statystyczne opracowanie liczby powtórzeń pomiarów.....	47
4.2. Warunki zasadniczych badań doświadczalnych.....	51
4.2.1. Przedmiot i obiekt badań.....	51
4.2.2. Zakres i model badań.....	51
4.3. Stanowisko badawcze.....	57
5. WYNIKI BADAŃ PODSTAWOWYCH I ICH INTERPRETACJA.....	60
5.1. Zmiana geometrycznych cech konstrukcyjnych próbek jako miara... intensywności procesu zużywania.....	60
5.2. Zmiana masy próbek w wyniku procesu zużywania.....	78
5.3. Zmiana temperatury a intensywność procesu zużywania.....	81
5.4. Zmiana poboru mocy podczas procesu zużywania.....	85
6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	89
6.1. Wnioski teoretyczne.....	89

6.2. Wnioski praktyczne.....	89
6.3. Proponowane kierunki dalszych badań oraz podsumowanie pracy.....	90
LITERATURA.....	91

SYMBOLE I AKRONIMY CZĘŚCIEJ UŻYWANE W PRACY

Symbole

<i>F</i>	–	siła obciążająca, N,
<i>L</i>	–	droga tarcia, m,
<i>H</i>	–	stan materiału – jego wartość, HRC,
<i>P</i>	–	moc, kW,
<i>Ra</i>	–	średnia arytmetyczna rzędnych profilu, μm ,
<i>Rpk</i>	–	zredukowana wysokość wzniesienia profilu chropowatości, μm ,
<i>Rq</i>	–	średnia kwadratowa rzędnych profilu, μm ,
<i>Rt</i>	–	całkowita wysokość profilu, μm ,
<i>Spk</i>	–	zredukowana wysokość wzniesień powierzchni chropowatości, μm ,
<i>Sq</i>	–	średnie kwadratowe odchylenie od płaszczyzny średniej, μm ,
<i>St</i>	–	całkowita wysokość powierzchni, μm ,
<i>T</i>	–	temperatura, $^{\circ}\text{C}$,
<i>v</i>	–	prędkość ruchu względnego, m/min,
α	–	kąt skojarzenia (przecięcia) charakterystycznych śladów po obróbce (kierunkowość struktury), $^{\circ}$,
Δl	–	zmiana (ubytek) wymiaru liniowego, μm ,
Δm	–	zmiana (ubytek) masy, mg,

Skróty i akronimy

2 D	–	układ dwuwymiarowy,
3 D	–	układ trójwymiarowy,
EW	–	eksploatacyjna warstwa wierzchnia,
PE	–	preparat eksploatacyjny,
PS	–	przenoszenie selektywne,
SGP	–	struktura geometryczna powierzchni,
SM	–	kompozycja smarowa – rodzaj,
TW	–	technologiczna warstwa wierzchnia,
WW	–	warstwa wierzchnia.

1. GENEZA I PROBLEMATYKA PRACY

Procesy zużywania są nieodłącznie związane z istnieniem obiektów technicznych. Wpływają one destrukcyjnie na ich stan techniczny, prowadzą do dających się obserwować uszkodzeń. Ponieważ większość tych uszkodzeń zachodzi w warstwie wierzchniej (WW) współpracujących elementów, to właśnie warstwie tej nadaje się cechy zwiększające odporność na niszczące działanie wymuszeń podczas pracy maszyn i urządzeń. Warstwa wierzchnia jest więc obiektem badań prowadzonych w wielu ośrodkach naukowych krajowych i zagranicznych. Stwierdzono, że od cech warstwy wierzchniej ukonstytuowanej w wyniku realizacji założonego procesu technologicznego zależy mechanizm i intensywność procesu zużywania, np. [27, 83, 92, 102]. Uzasadnione jest więc podejmowanie badań mających na celu lepsze poznanie mechanizmu tego procesu i sposobów sterowania nim, gdyż w rezultacie pozwala to na zmniejszenie niepożądanych jego skutków.

Podstawowym sposobem, zmniejszającym intensywność procesu zużywania jest smarowanie współpracujących powierzchni. Do tego celu używa się środków smarowych stanowiących zazwyczaj mieszaninę oleju bazowego i dodatków smarowych. Poznając jak najobszerniej reguły i mechanizmy występujące podczas zużywania elementów pary cieiernej, można dobrać dodatki smarowe, tak, aby podczas eksploatacji zapewniały minimalne zmiany w warstwie wierzchniej, a zarazem jak najdłuższy czas pracy z niezmiennymi, założonymi konstrukcyjnie cechami pary trąceej.

Na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy od wielu lat prowadzone są badania, m.in. nad wpływem dodatków smarowych na proces zużywania par kinematycznych przy kryteriach tribologicznych, np. [55, 57, 58, 59, 104, 105, 106]. Prezentowana praca stanowi więc kontynuację dotychczasowych działań w przedstawionej powyżej tematyce.

Ze względu na uwzględniane rodzaje dodatków smarowych, do analizy zmian zachodzących w parze cieiernej, jako reprezentatywną parę kinematyczną przyjęto parę współpracujących powierzchni ze stykiem konforemnym. Pary takie występują powszechnie w stosowanych rozwiązaniach konstrukcyjnych węzłów cieiernych.

Problematyka pracy dotyczy zagadnień tribologicznych, mieści się zatem w dyscyplinie naukowej „Budowa i eksploatacja maszyn” – jednej ze specjalności w powyższej dyscyplinie.

2. ANALIZA STANU WIEDZY Z ZAKRESU TEMATYKI PRACY – STUDIUM LITERATUROWE

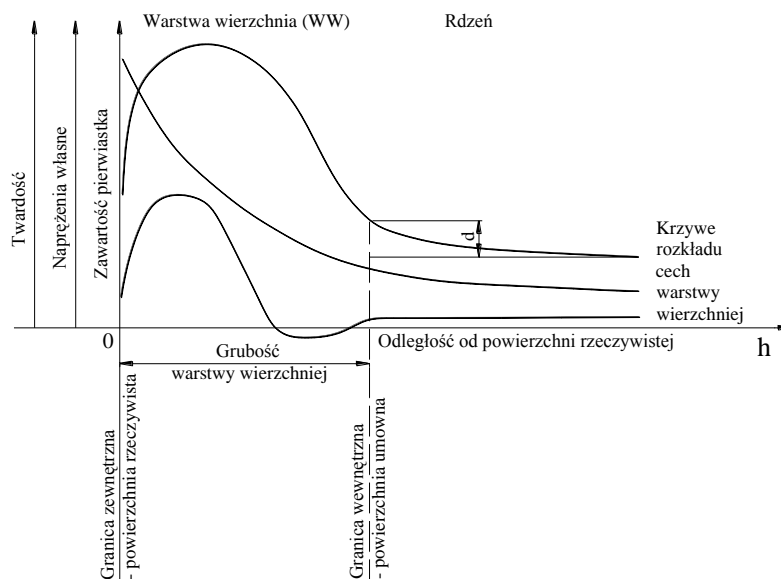
2.1. Warstwa wierzchnia

W literaturze tematu można znaleźć liczne definicje WW. Choć niekiedy różnią się one między sobą to istota WW pozostaje zawsze taka sama. Potwierdzeniem tego spostrzeżenia mogą być przytoczone poniżej definicje.

Zgodnie z fundamentalną pozycją [13], jako warstwę wierzchnią elementu rozumie się: „... zbiór punktów materialnych zawartych pomiędzy jego powierzchnią zewnętrzną a pewną powierzchnią umowną, będącą granicą zmian wartości cech strefy podpowierzchniowej, powstałych w wyniku różnych wymuszeń zewnętrznych: nacisku, temperatury, czynników chemicznych, elektrycznych, bombardowania cząstkami naładowanymi i elektrycznie obojętymi i innymi. Pozostała część materiału przedmiotu poza warstwą wierzchnią – to rdzeń.”

Powierzchnia rzeczywista elementów urządzeń, która charakteryzuje się bardzo złożoną budową stereometryczną – występują na niej nierówności o różnych wymiarach, kształtach i położeniu – stanowi zewnętrzną część warstwy materiału zwanej warstwą wierzchnią (WW).

W polskiej normie dotyczącej warstwy wierzchniej [87] zdefiniowano ją jako: „... warstwa materiału ograniczona rzeczywistą powierzchnią przedmiotu, obejmująca tę powierzchnię oraz część materiału w głąb od powierzchni rzeczywistej, która wykazuje zmienione cechy fizyczne a czasami chemiczne w stosunku do cech tego materiału w głębi przedmiotu”. Zmiany cech WW w funkcji odległości od powierzchni, zgodnie z wyżej wymienioną definicją przedstawiono schematycznie na rysunku 2.1. Przedstawione na nim wielkości stanowiące cechy charakterystyczne WW są tylko przykładowe.



Rys. 2.1. Rozmieszczenie przykładowych cech w WW [13]

Definicję WW bardzo podobną do zawartej w cytowanej normie, przedstawiono także we wcześniejszym opracowaniu [28].

Zwiększenie zainteresowania i zintensyfikowania badań WW elementów maszyn obserwuje się od przełomu XIX i XX w. Początkowo, za jedyną cechę charakterystyczną powierzchni uzyskanej w rezultacie obróbki skrawaniem uznawano jej gładkość (chropowatość). W późniejszym okresie badania rozszerzono na warstwy wierzchnie uzyskane innymi technikami. Rozszerzono także zbiór wielkości, które opisują stan WW. Prace te umożliwiają bliższe poznanie i rozszerzenie wiedzy o cechach powierzchni uzyskanych jako wynik różnych procesów obróbki, głównie wykończeniowej.

Liczne badania, np. [4, 15, 16, 17, 36, 43, 84, 101] wykazały ścisły związek między stanem WW elementów maszyn, a cechami tribologicznymi tych elementów. Można zatem stwierdzić, że stan WW w decydujący sposób determinuje cechy użytkowe całej maszyny. Stwierdzono także, że od stanu WW utworzonej w wyniku realizacji założonego procesu technologicznego, zależy przebieg zużywania – jego intensywność, mechanizm oraz skutki działania [27, 83, 92, 102, 127]. Z tego powodu WW jest przedmiotem badań realizowanych w wielu ośrodkach naukowych – zagranicznych i krajowych. Zainteresowanie to podtrzymuje ciągle powiększające się zbiory tworzyw konstrukcyjnych oraz technik konstituowania WW, a także zwiększające się możliwości badawcze zarówno w sferze aparaturowej jak i stosowanych metod.

Warstwa wierzchnia elementów maszyn konstituowana podczas procesu wytwarzania jest nazywana technologiczną warstwą wierzchnią (TWW) [7, 13, 45]. Jej cechy, tzn. właściwości, własności i struktura, w największym stopniu

zależą od parametrów i rodzaju stosowanej obróbki wykończeniowej oraz od rodzaju materiału konstrukcyjnego, z którego wykonano współpracujące elementy.

Uzyskane w procesie wytwórczym cechy eksploatacyjne nie są stałe. Pod wpływem eksploatacyjnych wymuszeń zewnętrznych, np. obciążenia, temperatury, oddziaływania środowiska itp., ulegają one zmianom. Zmiany mogą również wystąpić samorzutnie, bez udziału czynników zewnętrznych, np. w rezultacie starzenia się, czy też odprężania. Warstwa wierzchnia w tej fazie istnienia maszyny nazywa się eksploatacyjną warstwą wierzchnią (EWW) [7, 11, 12, 13, 45].

Uwzględniając fazy istnienia („życia”) maszyny dwie wymienione wyżej odmiany WW występują odpowiednio w fazach:

- wytwarzania elementów maszyn i montażu ich w całość – TWW, przy czym jej cechy są określone już w fazach konstruowania i projektowania,
- eksploataowania i utylizacji maszyny – EWW.

W literaturze znaleźć można zróżnicowane informacje jak należy kwalifikować WW elementów w fazie przejściowej, tj. podczas magazynowania i transportu – do EWW czy TWW. W pracy [10] proponuje się zaliczyć ją do EWW, natomiast Autor pracy [54] zalicza ją do TWW. Należy zaznaczyć, że swoje propozycje Autorzy popierają merytorycznymi argumentami. Jest to o tyle istotne, że w tej fazie istnienia elementu cechy jego warstwy wierzchniej też mogą ulegać zmianom, samorzutnie, szczególnie jeśli ten okres jest długi, bądź pod wpływem wymuszeń zewnętrznych, np. oddziaływanie składników aktywnych substancji konserwujących, czy też drgania podłoża. Odnosząc WW w tej fazie do istniejących jej odmian, tj. TWW i EWW, nazywa się ją potechnologiczną lub przedeksploatacyjną warstwą wierzchnią.

2.1.1. Modele warstwy wierzchniej

W literaturze przedmiotu spotkać można różne modele budowy warstwy wierzchniej. Różnią się one zazwyczaj stopniem przyjętych uproszczeń. Wszystkie modele WW zakładają jej budowę strefową: od 3–strefowego modelu zaproponowanego w pracy [36] do modelu najbardziej rozbudowanego 9–strefowego [23]. Każda z tych stref ma określoną głębokość (grubość) i jest wyznaczana obszarem występowania określonych cech WW.

W modelach o większej liczbie stref, nowe powstały poprzez podzielenie stref istniejących lub wprowadzenie dodatkowych [31, 39, 109]. W dużej części przypadków granice poszczególnych stref nie są wyraźne. Niektóre strefy mogą nie występować lub wzajemnie się przenikać, tworząc obszary łagodnego zanikania cech jednej strefy z równoległym pojawianiem się cech drugiej.

W najprostszym modelu Kolmana wyróżnia się następujące strefy [36]:

- zewnętrzna – utworzona z cząstek pochodzenia obcego, pokryta powłoką gazową (zaadsorbowanych gazów), grubość jej wynosi $0,001 \pm 0,02 \mu\text{m}$, w tym powłoki gazowej – ok. $(2 \div 3) \cdot 10^{-4} \mu\text{m}$,
- środkowa – składającej się z silnie zgniecionych ziarn materiału rdzenia, grubość jej wynosi $0,5 \div 500 \mu\text{m}$ (decyduje ona o właściwościach użytkowych),
- wewnętrzna – jest to warstwa składająca się z ziarn nie odkształconych plastycznie, ale mających strukturę inną od materiału rdzenia, grubość jej dochodzi do kilku tysięcy mikrometrów.

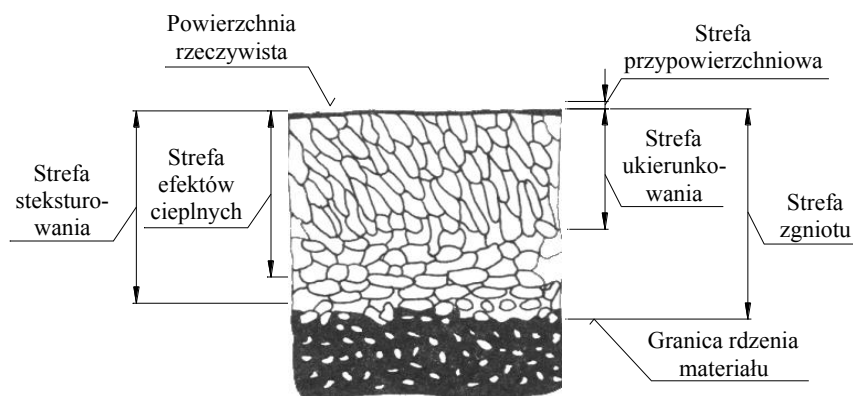
Model najbardziej rozwinięty składa się z 9 stref [23]:

- I – stanowi pole elektryczne nad powierzchnią metalu („nadpowierzchnia”),
- II – powstaje w wyniku adsorbowania na powierzchni metali polarnych cząstek pochodzenia organicznego (tłuszcze – smary, pot, itp.),
- III – powstaje w wyniku adsorpcji cząsteczek wody (zwykle z par),
- IV – powstaje w wyniku adsorpcji gazów (azotu, par siarki, fosforu),
- V – stanowi warstewkę tlenków metalu rdzenia, powstałą w wyniku reakcji chemicznej tlenu z materiałem rdzenia,
- VI – powstaje w wyniku uszkodzenia ziarn metalu rdzenia przez narzędzie skrawające,
- VII – obejmuje obszar metalu odkształconego plastycznie odznaczający się wyraźną włóknistością, a niekiedy i stekstrowaniem,
- VIII – obejmuje obszar metalu tylko odkształconego plastycznie (nie stekstrowany),
- IX – obejmuje obszar odkształceń sprężystych i naprężeń rozciągających.

W zależności od celu badań i związanej z nim niezbędnej szczegółowości analiz, w rozważaniach przyjmuje się modele o większej lub mniejszej liczbie stref.

Zjawiska tribologiczne zależą przede wszystkim od stanu warstwy wierzchniej obszarów styku trących się elementów maszyn. Zużycie tych elementów to w istocie zużycie WW, powodowane wszystkimi rodzajami tarcia.

Na potrzeby niniejszej pracy, ze względu na cel pracy (obserwacja skutków transformacji EWW), w dalszych rozważaniach przyjęto znormalizowany 5–strefowy model [87], który nie jest nadmiernie rozbudowany, a jednocześnie jest dostatecznie szczegółowy. Występujące w nim strefy przedstawiono na rysunku 2.2.



Rys. 2.2. Schemat 5–strefowego modelu warstwy wierzchniej [87]

W modelu tym identyfikuje się następujące strefy:

- przypowierzchniową – stanowi ona część WW przylegającą bezpośrednio do powierzchni rzeczywistej, nie ma charakterystycznej struktury własnej, zbudowana jest z jonów zaadsorbowanych lub związanych chemicznie z podłożem pochodzących z otaczającego ośrodka lub z innych elementów współpracujących z przedmiotem,
- ukierunkowania – leżącą pod strefą przypowierzchniową, występuje w niej ukierunkowanie ziarn materiału, np. na skutek odkształceń plastycznych,
- efektów cieplnych – jest to strefa, w której na skutek procesów cieplnych nastąpiły np. przemiany fazowe, przemiany fizyczne, zmiany wymiarów ziarn, reakcje chemiczne itp.,
- stekstrowania – jest to strefa, w której występuje tekstura krystaliczna,
- zgniotu – jest to strefa odkształcenia plastycznego.

2.1.2. Wielkości opisujące stan warstwy wierzchniej

Cechy użytkowe maszyn są funkcją m.in. parametrów stanu warstwy wierzchniej ich elementów wywołanego obróbką oraz eksploatacją. Trwałość elementów maszyn i niezawodność obiektów technicznych, powinna więc dać się opisać cechami WW elementów par kinematycznych biorących udział w procesie tarcia z uwzględnieniem przewidywanych wymuszeń zewnętrznych. Z tego powodu celowe są próby utworzenia zbioru istotnych parametrów stanu

WW elementów maszyn, na podstawie których będzie można wnioskować o stanie obiektu technicznego oraz przewidywać możliwości uszkodzeń. Zadania te są podstawowymi czynnościami diagnostyki technicznej, i są to odpowiednio: diagnozowanie i prognozowanie [125, 126, 127]. Mają one na celu podniesienie jakości użytkowej maszyn i urządzeń, poprzez umożliwienie sterowania cechami trwałościowo–niezawodnościowymi.

Stan warstwy wierzchniej, a więc jej własności i właściwości, wyznaczany jest przez zbiór cech, które można opisać parametrami: stereometrycznymi, fizykochemicznymi i stereometryczno–fizykochemicznymi [5, 13, 30, 108].

O własnościach i właściwościach WW w największym stopniu decydują parametry opisujące strukturę stereometryczną powierzchni, nazywaną częściej strukturą geometryczną powierzchni (SGP) [9, 13, 17, 28, 30, 114]. Strukturę tę tworzą nierówności powierzchni, czyli wzniesienia i wgłębienia będące śladami realizowanej obróbki lub będące skutkami procesu zużywania. W zależności od rozmieszczenia charakterystycznych elementów SGP powierzchnia może mieć charakter anizotropowy – o ukierunkowanym usytuowaniu wzniesień i wgłębien (kierunkowość struktury) lub izotropowy – nie wykazujący takiego ukierunkowania [66, 67, 71, 73].

Do grupy parametrów opisujących SGP zalicza się następujące parametry [13, 28, 66, 73, 118]:

- chropowatość,
- kierunkowość,
- defekty SGP,
- falistość.

Do parametrów fizykochemicznych określających stan WW zalicza się wielkości opisujące następujące cechy [8, 13, 29]:

- strukturalne materiału (jego budowa),
- mechaniczne (kruchość, naprężenia własne, twardość),
- chemiczne (skład chemiczny, adsorpcja chemiczna, absorpcja),
- fizyczne (adsorpcja fizyczna, adhezja),
- magnetyczne (przenikalność, koercja),
- elektryczne (rezystancja, konduktywność).

Jako parametry stereometryczno–fizykochemiczne przyjmuje się [30]:

- energię powierzchniową,
- napięcie powierzchniowe,
- emisyjność,
- odbijalność.

W każdej z wymienionych grup parametrów są wielkości w większym lub mniejszym stopniu istotne dla procesu eksploatacji, a tym samym dla procesu zużywania. Poza tym, ich znaczenie nie jest takie same w każdych warunkach pracy pary kinematycznej.

Z punktu widzenia własności tribologicznych elementów par ciernych do najistotniejszych wielkości opisujących stan WW należy zaliczyć [13, 27, 82]:

- wśród stereometrycznych:

- chropowatość;
- kierunkowość struktury;
- spośród fizykochemicznych:
 - rodzaj tworzywa konstrukcyjnego,
 - jego budowę,
 - naprężenia własne,
 - twardość.

2.1.2.1. Cechy fizykochemiczne warstwy wierzchniej

Rodzaj tworzywa konstrukcyjnego elementu pary kinematycznej i jego mikrostruktura (struktura metalograficzna) wpływa na właściwości warstwy wierzchniej tych elementów. Mikrostruktura jest definiowana jako budowa WW obejmująca rozmieszczenie elementów składowych (kryształów, ziarn, uporządkowanie atomów w sieci krystalicznej) oraz zespół relacji między tymi elementami [13, 28].

Mikrostruktura tworzywa konstrukcyjnego

Metale oraz większość niemetali mają strukturę krystaliczną, czyli budowę wewnętrzną złożoną z kryształów, o ściśle określonym rozmieszczeniu jonów, atomów, czy cząsteczek w komórkach elementarnych kryształu.

Warstwa wierzchnia może mieć następującą mikrostrukturę:

- pierwotną – powstałą przy przejściu metalowej fazy ciekłej w fazę stałą,
- wtórną – powstałą z mikrostruktury pierwotnej po przekryształowaniu w stanie stałym na skutek różnych przemian fazowych lub też obróbki plastycznej.

Mikrostruktura pierwotna w warstwie wierzchniej występuje raczej rzadko, np. przy przetopieniach (elektronowym, laserowym, plazmowym), natomiast mikrostruktura wtórna występuje prawie zawsze, przy czym przemiany mikrostruktury mogą zachodzić wielokrotnie bądź w trakcie procesu wytwarzania, bądź w trakcie eksploatacji.

Naprężenia własne

Naprężenia własne odzwierciedlają stan sił wewnętrznych, który wynika z wzajemnego oddziaływania w rozpatrywanym miejscu dwóch części materiału, położonych po obu stronach umownego przekroju materiału, odniesionych do danej jednostki przekroju.

Wynikiem działania obciążeń zewnętrznych jest zmiana położenia atomów sieci krystalicznej materiału. Zakłóca w ten sposób budowę sieci, a tym samym powoduje się stan naprężeń własnych materiału. Po zaprzestaniu oddziaływań zewnętrznych zanika pierwsza część zmian, w formie odkształceń

sprężystych (zmiany odwracalne) i wywołanych nimi naprężeń, natomiast pozostaje w materiale druga część w postaci np. odkształceń plastycznych (zmiany nieodwracalne) i wynikających stąd naprężeń, które od tego momentu stanowią naprężenia własne materiału [31, 126].

Naprężenia własne klasyfikować można według następujących kryteriów [13, 28]:

- ze względu na obszar równoważenia się – mikro-, makro- i subnaprężenia własne (równoważące się odpowiednio: w obszarze całego przedmiotu lub warstwy wierzchniej, w obszarze ziarna czy też w obrębie kryształu),
- ze względu na przyczynę powstania – mechaniczne (odkształcenia plastyczne), cieplne (rozszerzalność cieplna) oraz strukturalne (zmiany objętości właściwej składników strukturalnych),
- ze względu na oddziaływanie – ściskające oraz rozciągające,
- ze względu na wywołujące je operacje obróbkowe – odlewnicze, hartownicze, spawalnicze.

Z uwagi na to, że naprężenia własne sumują się z naprężeniami pochodzącymi od obciążeń zewnętrznych, ze względu na wytrzymałość bardzo korzystne jest, aby w warstwie wierzchniej materiału występowały naprężenia ściskające (ze znakiem ujemnym). Wówczas naprężenia te odejmują się od naprężeń pochodzących od sił zewnętrznych.

Twardość

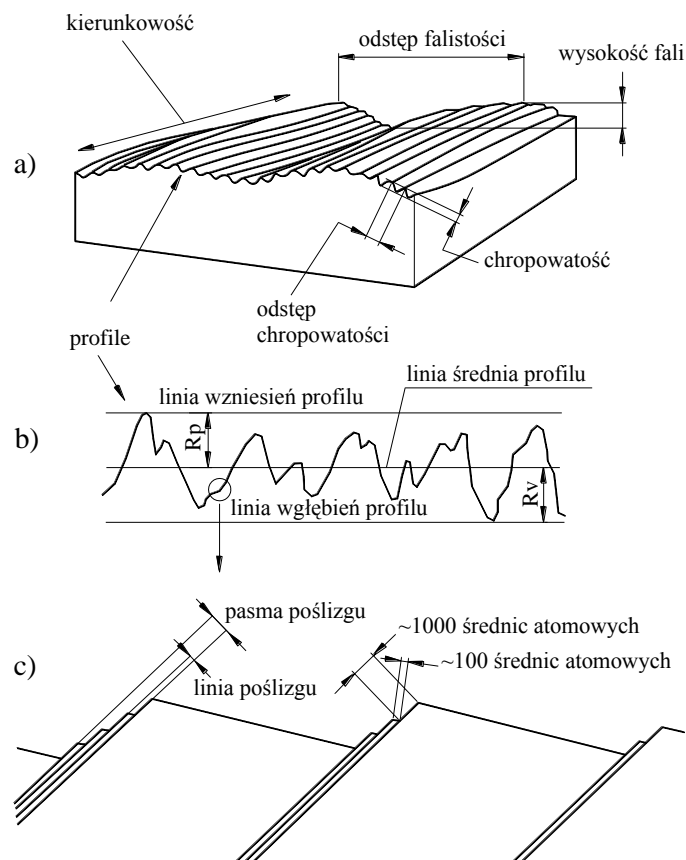
Twardość jest właściwością ciała stałego charakteryzującym się stawianiem oporu odkształceniom plastycznym lub pęknięciom przy lokalnym, silnym oddziaływaniu na jego powierzchnię innego twardszego materiału.

Twardości nie można zdefiniować poprzez inne wielkości fizyczne. Jest to więc cecha umowna, która umożliwia porównywanie odporności różnych materiałów na uszkodzenia powierzchni.

Ogólnie, twardość WW elementów par kinematycznych powinna być tym większa, im większe naciski będzie ona przenosić. Twardości jednak często wiąże się z kruchością – cechą najczęściej ujemną – która jest odwrotnością twardości, dlatego zakładając określoną twardość elementów należy również uwzględnić dopuszczalną kruchość materiału.

2.1.2.2. Cechy struktury geometrycznej powierzchni

Wielkości charakteryzujące strukturę geometryczną powierzchni przedstawione zostały na rysunku 2.3.



Rys. 2.3. Struktura geometryczna powierzchni: a) schemat falistości i ukierunkowania chropowatości, b) profil chropowatości, c) submikrochropowatość [110]

Ze względu na skalę obserwacji, cechy SGP można przyporządkować jako [122]:

- makroskopowe (falistość),
- mikroskopowe (parametry kierunkowości i chropowatości),
- submikroskopowe (submikrochropowatość – nierówności o wysokości poniżej $0,01 \mu\text{m}$).

Pośród wielkości opisujących strukturę geometryczną powierzchni jako podstawowe przyjmuje się parametry kierunkowości powierzchni oraz jej chropowatości [13, 28, 66, 73, 75, 81, 82, 111, 112].

Potwierdzeniem tego spostrzeżenia może być również klasyfikacja SGP przedstawiona w pracach [71, 73, 98]. Jako kryteria jej klasyfikacji przyjęto:

- sposób obróbki wykończeniowej,
- kierunkowości śladów obróbki (kierunkowość SGP),
- wartości parametrów chropowatości.

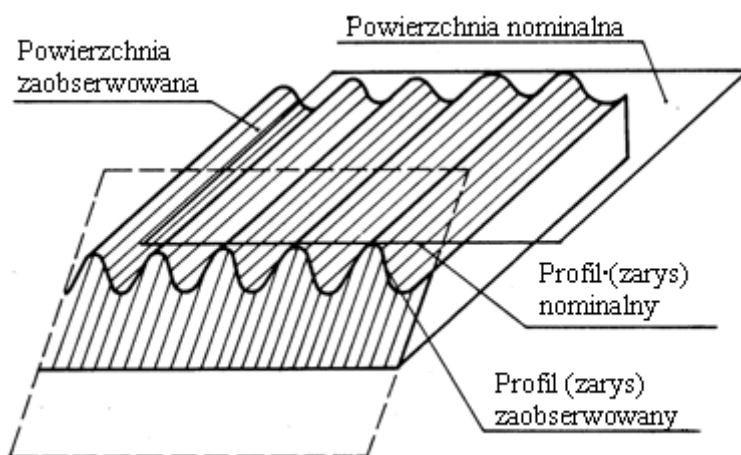
Chropowość powierzchni

Zgodnie z definicją chropowość powierzchni określana jest w Polskiej Normie [86], jako zbiór nierówności powierzchni rzeczywistej, umownie określanych jako odchyłki profilu zmierzonego od linii odniesienia w granicach odcinka, na którym nie uwzględnia się odchyłek falistości i kształtu.

Chropowość wyznaczana jest na podstawie profilu powierzchni. Można zatem powiedzieć, że profil powierzchni (profil chropowości) jest podstawowym elementem charakterystyki chropowości powierzchni. Zmierzony profil powierzchni stanowi profil uzyskany przez przecięcie powierzchni przedmiotu płaszczyzną o określonym położeniu względem powierzchni nominalnej (rys. 2.4). Bardzo często przecięcie jest prostopadłe do powierzchni przedmiotu lub do płaszczyzny stycznej do niej, i wykonane w kierunku dającym przypuszczalnie największą odchyłkę profilu (kąt prosty do kierunkowości struktury powierzchni) [13, 28, 119].

Linie, która opisuje profil chropowości oznacza się funkcją:

$$z = f(x)$$



Rys. 2.4. Profil powierzchni z elementami chropowości [13, 86]

Takie ujęcie zagadnienia sprowadza je do określenia parametrów chropowości w układzie dwuwymiarowym (2D).

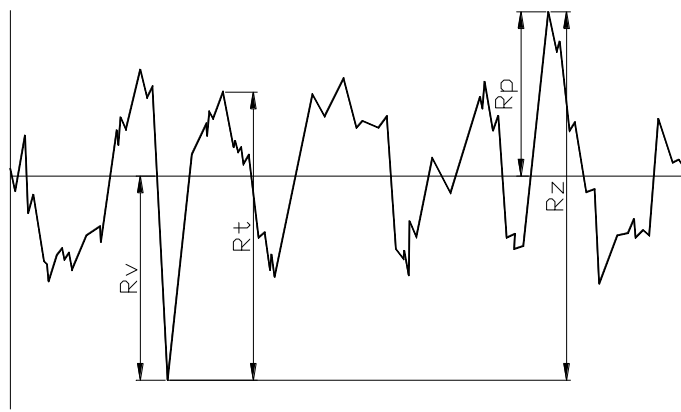
Parametry chropowości, określające SGP w układzie dwuwymiarowym, ujęte zostały w normie [86]. Sklasyfikowano je w następujących grupach [81, 86, 119]:

- parametry pionowe (amplitudowe),
- parametry poziome (odległościowe),
- parametry hybrydowe (mieszane),
- charakterystyczne krzywe.

Wśród parametrów pionowych, wyróżnia się te, których wartość można odczytać bezpośrednio z profilogramu (z wyjątkiem Rc) – rys. 2.5 oraz takie, które się oblicza na podstawie wyników pomiarów.

Do pierwszej grupy zalicza się parametry:

- Rc – średnia wysokość elementów profilu,
- Rv – głębokość najniższego wgłębienia profilu,
- Rz – największa wysokość profilu,
- Rp – wysokość najwyższego wzniesienia profilu,
- Rt – całkowita wysokość profilu.



Rys. 2.5. Parametry chropowatości amplitudowe (pionowe)

Natomiast parametry pionowe, obliczane na podstawie profilogramu (wartości średnie rzędnych) to:

- Rku – współczynnik nachylenia profilu,

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^4(x)| dx \right],$$

- Ra – średnia arytmetyczna rzędnych profilu,

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx,$$

- Rq – średnia kwadratowa rzędnych profilu,

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l |Z^2(x)| dx},$$

- Rsk – współczynnik asymetrii profilu,

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^3(x)| dx \right],$$

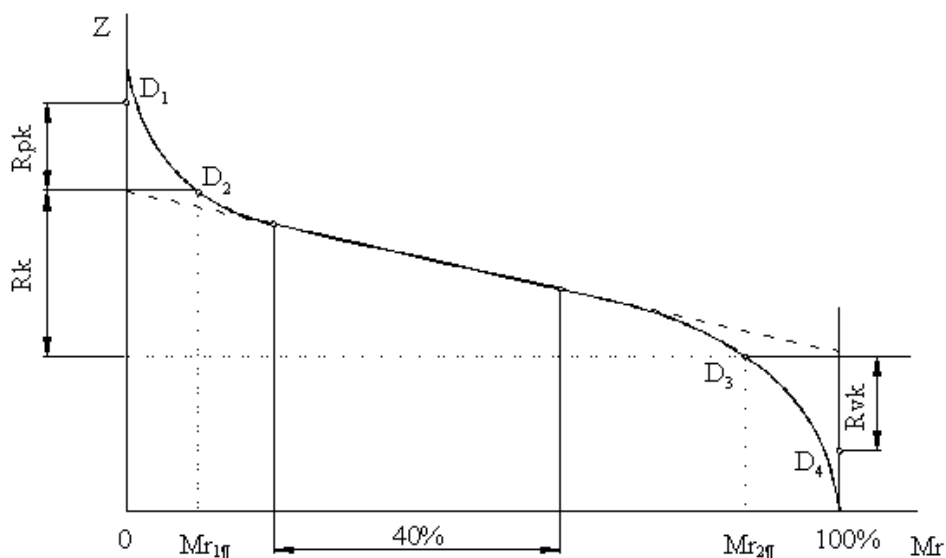
Do pozostałych parametrów chropowatości wg normy [86] zaliczono m.in.:

- parametr odległościowy (poziomy) to:
 - RSm – średnia szerokość rowków elementów danego profilu,
- parametr hybrydowy (mieszany) to:
 - $R\Delta q$ – średni kwadratowy wznios profilu,
- charakterystyczne krzywe to:
 - Rmr – udział materiałowy profilu,
 - krzywa udziału materiału profilu – krzywa nośności (Abbotta–Firestona),
 - $R\delta c$ – różnice między dwoma poziomami cięcia,
 - krzywa gęstości amplitudowej.

Charakterystyki nierówności powierzchni w postaci krzywych wprowadza się w celu pełniejszej oceny właściwości powierzchni. Największe zastosowanie ma krzywa udziału materiału – krzywa nośności (rozkład względnej długości nośnej). Krzywa ta jest nazywana również wykresem Abbotta–Firestone’a i opisuje ona rozkład materiału w profilu [1, 81]. Ponieważ krzywa ta informuje o przebiegu profilu można z niej odczytać właściwości danego profilu w aspekcie funkcji powierzchni [1, 48, 69]. Parametry, które otrzymujemy z krzywej nośności profilu, jednocześnie charakteryzujące tę krzywą to [1, 19, 81]:

- Rk – zredukowana wysokość chropowatości, μm ,
- Rpk – zredukowana wysokość wzniesienia profilu chropowatości, μm ,
- Rvk – zredukowana wysokość wgłębienia profilu chropowatości, μm ,
- Mr_1 – udział nośny wierzchołków, %,
- Mr_2 – udział nośny wgłębień, %.

Interpretacje graficzną wyżej wymienionych parametrów przedstawiono na rysunku 2.6.



Rys. 2.6. Typowy wykres krzywej nośności [83, 86]

Strukturę częstotliwościową profilu opisuje funkcja autokorelacji oraz związana z nią przekształceniem Fouriera funkcja gęstości widmowej mocy. W badaniach, w zależności od ich celu, przyjmują się jedną z powyższych funkcji. Częściej jednak wykorzystuje się funkcję gęstości widmowej mocy, na podstawie której ocenić można wpływ składowych siły skrawania [6], oraz stanu ostrza skrawającego [37, 47, 56] na SGP bądź zachodzące w niej zmiany podczas eksploatacji.

W literaturze przedmiotu proponowane są także inne klasyfikacje parametrów i ich zbiorów, np. w pracach [64, 65, 66, 67], wprowadzono następujący podział grup parametrów:

- wysokościowe: R_a , R_q , R_p , R_v , R_t ,
- wzdłużne: S_m , S , S_{wm} , λ_q ,
- pochylenia: $\Delta\alpha$, Δq , θ , γ ,
- określające promienie zaokrągleń wierzchołków chropowatości,
- stanowiące funkcje autokorelacji i gęstości widmowej mocy,
- rozkłady nośności i wierzchołków.

Współczesne maszyny pomiarowe (profilografometry) umożliwiają pomiar i rejestrację bardzo wielu parametrów chropowatości. Część z nich jest powiązana ze sobą i zależna od siebie. Prowadzi to często do sytuacji, w której użytkownik sam musi decydować, które parametry wybrać do oceny powierzchni.

W pracy [60] Autor przedstawił 39 parametrów, natomiast normy ISO zawierają 57 parametrów [18]. Różne wskaźniki chropowatości przedstawione są także w pracach [21, 32, 80, 121, 122, 123].

Obecnie na świecie istnieje tendencja do ujednocniania i zmniejszania liczby uprzywilejowanych parametrów w normach krajowych.

Autorzy pracy [35] ostrzegają przed używaniem nadmiernej liczby parametrów. Wprowadzanie nowych parametrów powinno być bardzo przemyślane i poprzedzone dokładnymi badaniami. Autorzy proponują też podział parametrów na dwie grupy parametrów: naukowe i przemysłowe. Podział taki może być jednak trudny do zrealizowania i budzi pewne wątpliwości.

W praktyce przemysłowej najczęściej stosowanym w pomiarach parametrem chropowatości jest Ra . Pozostałe, niezbędne do oceny chropowatości wybiera się na podstawie analizy zadań jakie ma dana powierzchnia spełniać.

Wszystkie przedstawione wyżej parametry chropowatości są w układzie dwuwymiarowym (2D). Ze względu na ograniczony obszar profilografowania, losowość wyboru miejsca pomiaru, trudności dokładnego odczytu wartości oraz trudność profilografowania powierzchni o złożonych kształtach metoda 2D powoduje ograniczoną dokładność oceny powierzchni. Z tego też powodu coraz szersze zastosowanie ma pomiar chropowatości w układzie trójwymiarowym (3D) [32, 68, 70, 72, 99, 113], mimo że nie ma jeszcze normy dotyczącej pomiarów w tym układzie. Według projektu takiej normy [100] SGP można scharakteryzować parametrami sklasyfikowanymi w następujących grupach:

- I grupa – parametry amplitudowe – korelujące z parametrami pionowymi 2D zawartymi w normie [86]:

- Sa – średnie arytmetyczne odchylenie od płaszczyzny średniej,

$$Sa = \frac{1}{NM} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} |Z_{x,y}|,$$

- Sq – średnie kwadratowe odchylenie od płaszczyzny średniej,

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} Z_{x,y}^2},$$

- St – całkowita wysokość powierzchni,
- Sp – wysokość najwyższego wzniesienia,
- Sv – głębokość najniższego wgłębienia,
- Sz – wysokość według 10 punktów,
- Ssk – symetria krzywej rozkładu głębokości,

$$Ssk = \frac{1}{NMSq^3} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} Z_{x,y}^3,$$

- Sku – płaskość krzywej rozkładu głębokości,

$$Sku = \frac{1}{NMSq^4} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} Z_{x,y}^4,$$

- II grupa – parametry objętościowe:
 - *STp* – nośność względna,
 - *SHTp* – wysokość nośności względnej,
 - *Smvr* – średnia objętość przestrzeni pustej,
 - *Smmr* – średnia objętość przestrzeni wypełnionej (materiału),

- III grupa – parametry przestrzenne:
 - *SPc* – gęstość pików między dwoma poziomami,
 - *Sds* – gęstość wierzchołków,
 - *Sal* – długość najszybszego spadku,
 - *Str* – stosunek względny struktury,
 - *Std* – kierunkowość struktury,

- parametry hybrydowe:
 - *Sdq* – średnie kwadratowe pochylenie,
 - *Ssc* – średnia arytmetyczna krzywej wierzchołków,
 - *Sdr* – rozwinięcie powierzchni,
 - *Sfd* – wymiar fraktalny,

- parametry charakteryzujące krzywą nośności (podobnie jak dla 2D):
 - *Sk* – zredukowana wysokość chropowatości,
 - *Spk* – zredukowana wysokość wzniesień powierzchni chropowatości,
 - *Svk* – zredukowana wysokość wgłębień powierzchni chropowatości,
 - *Sr1* – udział nośny wierzchołków,
 - *Sr2* – udział nośny wgłębień,
 - *Sbi* – wskaźnik nośności,
 - *Sci* – wskaźnik zatrzymania płynów (rdzeń),
 - *Svi* – wskaźnik zatrzymania płynów (dolina).

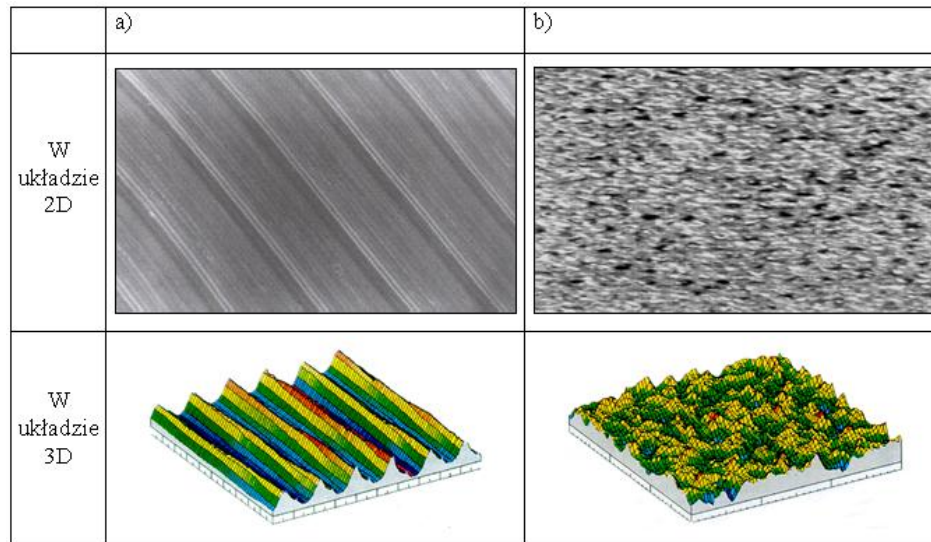
Charakterystyka trójwymiarowa chropowatości powierzchni nie może być pełna bez funkcji autokorelacji i gęstości widmowej mocy. Na podstawie wykresów tych funkcji – częściej autokorelacji – można określić czy powierzchnia ma charakter anizotropowy czy izotropowy.

Funkcja autokorelacji jest bardziej przydatna do oceny struktury o charakterze losowym, zaś funkcja widmowej gęstości mocy – zdeterminowanym [24, 117].

Kierunkowość struktury

Kierunkowość SGP charakteryzuje wzajemne usytuowanie śladów powstających na powierzchni w procesach: obróbkowym lub zużywania. Z tego

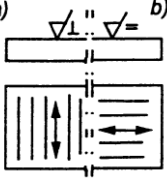
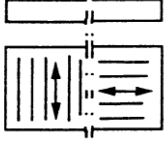
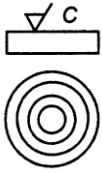
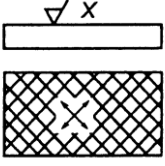

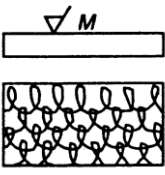
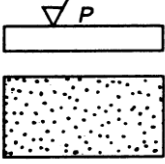
powodu wszystkie powierzchnie można ogólnie podzielić na ukierunkowane, mieszane oraz nieukierunkowane (rys. 2.7).



Rys. 2.7. Struktura geometryczna powierzchni: a) ukierunkowanej, b) nieukierunkowanej [73]

Charakter kierunkowości SGP regulują normy krajowe i międzynarodowe [20, 85]. W tabeli 2.1. przedstawiono klasyfikację kierunkowości SGP według w/w norm.

Tabela 2.1. Kierunkowość SGP uzyskiwana różnymi sposobami obróbki wg [20, 85]

Rodzaj kierunkowości	Odmiana kierunkowości	Symbol	Ślady obróbki i sposób oznaczania	Przykładowe obróbki dające daną strukturę
jednokierunkowa	prostopadła (a), równoległa (b) – do krawędzi, na której podano znak	\perp =	<p>a) </p> <p>b) </p>	toczenie wzdłużne, struganie, dłutowanie, frezowanie walcowe, przeciąganie, szlifowanie
	współśrodkowa	C		toczenie czołowe, frezowanie czołowe
wielokierunkowa	krzyżowa	X		frezowanie czołowe, honowanie (gładzenie)
	promieniowa	R		szlifowanie czołowe
	nieuporządkowana	M		skrobanie, docieranie, dogładzanie
bezkierunkowa	punktowa	P		obróbka elektroiskrowa, strumieniowo-ścierna, ultradźwiękowa

Struktury posiadające uprzywilejowane kierunki nazywamy strukturami anizotropowymi, natomiast struktury, które nie posiadają uprzywilejowanych śladów – strukturami izotropowymi. Jeżeli struktura ma prostoliniowe, równoległe ślady obróbki to nosi nazwę struktury ortotropowej.

Ogólnie, izotropia cech danego ośrodka znamieną jest tym, że w każdym kierunku wykazuje on te same właściwości geometryczne czy fizyczne. Izotropowość SGP oznacza więc strukturę jednakową we wszystkich kierunkach. Można powiedzieć, że jest to idealnie symetryczna struktura względem wszystkich możliwych osi symetrii [73, 76].

Za miarę izotropowości (lub anizotropowości) w układzie 2D przyjmuje się zwykle stosunek wartości wybranych parametrów chropowatości, zmierzonych dla dwu typowych wzajemnie uzupełniających się kierunków. Podstawą oceny są parametry wzdłużne lub pionowe [14, 71, 75, 81].

Analiza topografii powierzchni w układzie 3D wykazuje tę pozytywną cechę w stosunku do możliwości analizy profili nierówności (2D), że istnieje możliwość obliczenia parametrów charakteryzujących izotropię. Istnieje bardzo wiele sposobów określenia poziomu izotropowości SGP [2, 21, 28, 71]. Najbardziej uzasadniony wydaje się być sposób polegający na analizie funkcji autokorelacji (względnie widmowej gęstości mocy), której kształt jest smukły, wydłużony i asymetryczny w jednym kierunku w przypadku powierzchni anizotropowych, natomiast symetryczny i okrągły dla powierzchni izotropowych [21, 73, 76].

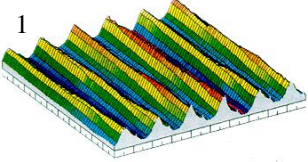
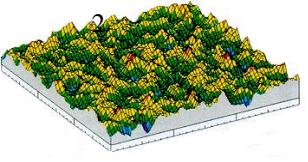
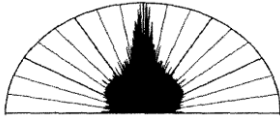

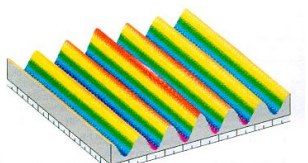
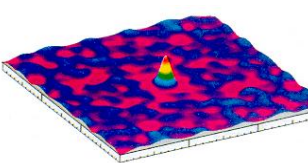
Wskaźnik izotropowości (I_z) wyrażać można bądź to w procentach od 0% do 100%, bądź w zakresie wartości od 0 do 1. Zdarza się, że zamiast wskaźnika izotropowości przyjmuje się jego odwrotność czyli wskaźnik anizotropowości. W pracy [73] autorzy określają wskaźnik izotropowości wyrażony w %, natomiast autorzy prac [21, 46] wyznaczają wskaźnik anizotropowości zawierający się w granicach od 0 do 1.

Wartości wskaźnika izotropowości bliskie zeru oznaczają strukturę całkowicie anizotropową, a bliskie jedności czy też 100% oznaczają strukturę całkowicie izotropową. Analogicznie określa się charakter struktury opisany wskaźnikiem anizotropowości. Przyjmuje się umownie podział poziomu izotropowości następująco [53]:

- $I_z < 20\%$ (0,2) – struktura anizotropowa,
- $20\% \leq I_z \leq 80\%$ - struktura mieszana,
- $I_z > 80\%$ (0,8) – struktura izotropowa.

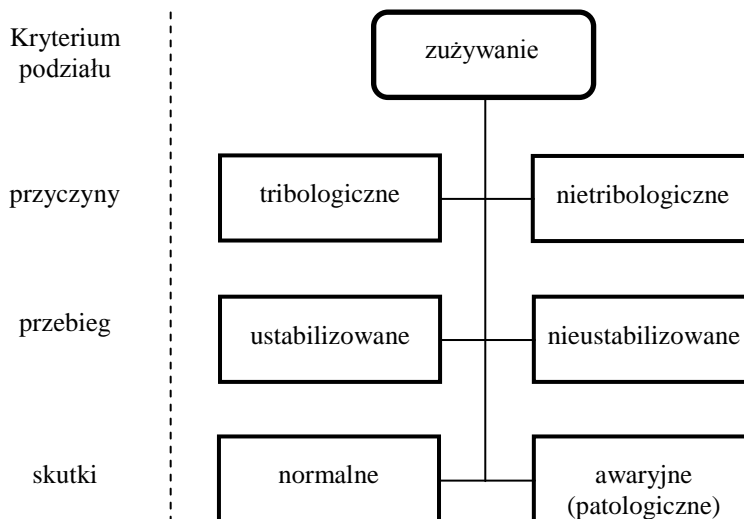
W tabeli 2.2. przedstawiono przykładowe struktury po różnych obróbkach, ich wykresy izotropowości oraz postaci funkcji autokorelacji w układzie 3D.

Tabela 2.2. Izotropowość przykładowych SGP: 1 – toczenie wykończeniowe, 2 – kulkowanie [73]

Obraz powierzchni		
Wykres izotropowości	 180° Izotropowość – 3,02 % 0°	 180° Izotropowość – 90,1 % 0°
Funkcja autokorelacji w układzie 3D		

2.2. Rodzaje procesów zużycia tribologicznego

W rezultacie oddziaływania na elementy pary kinematycznej wymuszeń eksploatacyjnych zachodzi proces zużycia. Gdy procesowi temu towarzyszy tarcie: ślizgowe bądź toczne to zużycie takie nazywamy tribologicznym – rys. 2.8.



Rys. 2.8. Klasyfikacja procesów zużycia elementów maszyn dla różnych kryteriów [44]

Jako zużywanie tribologiczne przyjmuje się zużywanie ściernie, zmęczeniowe, adhezyjne oraz przez utlenianie, natomiast do nietribologicznego zalicza się skutki procesów korozyjnych i erozyjnych. Ze względu na zakres pracy w dalszej części pracy zostanie uwzględnione tylko zużywanie tribologiczne.

Zużywaniem elementów par kinematycznych nazywa się ciągły proces zmian zachodzących w ich warstwie wierzchniej, prowadzący do niekorzystnych zmian cech WW. Zmiany te spowodowane są wzajemnym oddziaływaniem współpracujących powierzchni elementów tworzących pary i może być intensyfikowany otoczeniem środowiska pracy [30, 31, 33, 34, 44, 78, 79, 96, 115, 116, 120, 123].

Proces zużywania jest wynikiem destrukcyjnych zmian zachodzących w eksploatacyjnej warstwie wierzchniej. Za pomocą parametrów opisujących zużywanie, można wyznaczyć ilościowo zmiany w EWW.

Skutkiem procesu zużywania jest zużycie. Do oceny intensywności procesów zużywania, a tym samym wartości zużycia, wykorzystuje się różne bezwzględne albo względne miary [44, 93, 123].

Bezwzględną miarę zużywania (Z) stanowi objętość V_z albo masa m_z oddzielonego materiału od warstwy wierzchniej elementu lub też grubość h_z oddzielonej lub odkształconej części WW. Miary te można opisać następującymi zależnościami:

$$V_z = L_t \cdot b_t \cdot h_z$$

gdzie: L_t – długość drogi tarcia,

b_t – szerokość drogi tarcia,

h_z – grubość oddzielonej lub odkształconej strefy WW;

oraz:

$$m_z = V_z \cdot \rho$$

gdzie: ρ – gęstość materiału.

Względną miarą zużywania jest natomiast intensywność zużywania I , będąca odniesieniem ubytku objętościowego (ΔV_z), masowego (Δm_z) lub liniowego (Δl_z) do czasu (τ_t), pracy tarcia (P_t) lub drogi tarcia (L_t). Intensywność zużywania można więc zapisać odpowiednio:

$$I_\tau = \frac{Z}{\tau_t};$$

$$I_L = \frac{Z}{L_t};$$

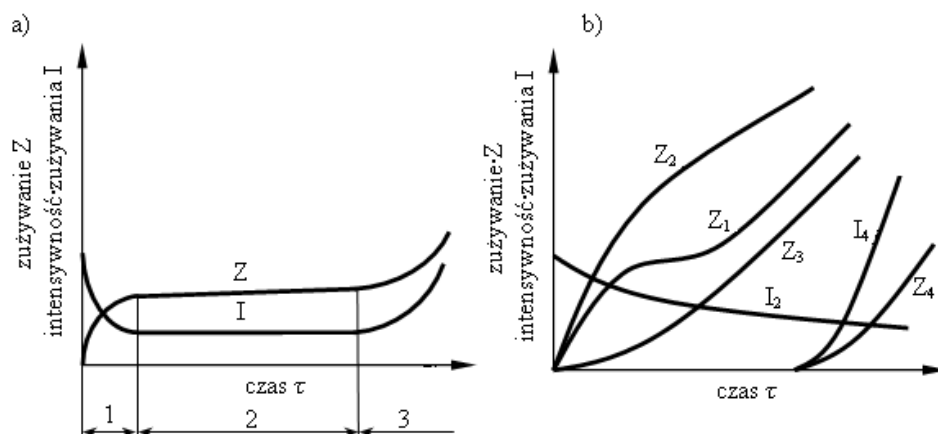
$$I_P = \frac{Z}{P_t};$$

gdzie: Z może przyjmować postaci: ΔV_z , Δm_z , Δl_z .

Odwrotność intensywności zużywania nazywa się odpornością na zużywanie [44, 93]. Wielkość tę można również interpretować w sposób

energetyczny jako pracę właściwą zużycia, czyli stosunek pracy tarcia do masy produktów zużycia [94, 95], lub gęstość energii tarcia, czyli stosunek pracy tarcia do objętości usuniętego materiału [25].

Gdy intensywność zużycia jest stała w czasie, proces przyjmuje się jako ustabilizowany, w przeciwnym razie – niestabilizowany (rys. 2.9).



Rys. 2.9. Charakterystyki procesów zużycia [44]:
a) ustabilizowany, b) niestabilizowany (opis w tekście)

Na rysunku 2.9a widać, że przy zużyciu ustabilizowanym można wyróżnić trzy okresy. Okres pierwszy (1) o zmiennej, ale malejącej intensywności zużycia – jest to okres docierania (dopasowywania) elementów, co odbywa się przy zwiększonej intensywności zużycia. Po dotarciu następuje okres drugi (2) – ustabilizowanej eksploatacji, w którym intensywność zużycia jest niemal stała. Zakończenie tego etapu i rozpoczęcie trzeciego (3) ujawnia się znacznym zwiększeniem intensywności zużycia, np. pod wpływem zwiększenia luzów w węzłach tribologicznych, czy też w wyniku zużycia utwardzonej strefy warstwy wierzchniej. Do pracy w tym okresie nie należy dopuszczać, ponieważ intensywność uszkodzeń elementów maszyn wzrasta bardzo gwałtownie, powodując tym samym znaczne zwiększenie kosztów usuwania skutków tych uszkodzeń.

W niektórych układach tribomechanicznych po okresie docierania nie występuje zużycie ustabilizowane (rys. 2.9.b). Przyczyną takiego przebiegu mogą być np.: produkty zużycia znajdujące się w nie wymienionym i nie filtrowanym oleju – krzywa z indeksem 1, utwardzanie się metali pod wpływem obciążeń normalnych – krzywa z indeksem 2 (zmniejszanie się intensywności zużycia), zużycie się przeciwzużyciowej warstewki powierzchniowej – krzywa z indeksem 3 (zwiększanie się intensywności zużycia), cykliczne naprężenia stykowe – krzywe z indeksami 4 (pewien czas pracy prawie bez zużycia).

Widoczne skutki zużywania w drugim okresie występują wówczas jeśli nie zachodzi dekohezja (utrata spójności) w obszarze rdzenia materiału rodzimego, a odkształcenia plastyczne i dekohezja przebiegają tylko w cienkich warstewkach struktur wtórnych oraz gdy istnieje równowaga dynamiczna między tworzeniem się tych struktur i ich zużywaniem. O skutkach awaryjnych – trzeci okres, mówimy wtedy, gdy zachodzi kohezja i węzeł cierny nie nadaje się już do dalszej pracy. Kontynuowanie procesu użytkowania w takich warunkach może spowodować rozległe uszkodzenie całej maszyny.

Zużywanie tribologiczne następuje w wyniku współpracy trących o siebie elementów pary kinematycznej, i jest rozumiane jako proces niszczenia i usuwania materiału z powierzchni ciał stałych w wyniku tarcia, przejawiający się ciągłą zmianą wymiarów i kształtów trących elementów.

Największy wpływ na zużywanie tribologiczne wykazuje stan SGP elementów trących i to zarówno w warunkach tarcia suchego, jak i z substancją smarującą. Spośród parametrów opisujących stan SGP na przebieg zużywania najbardziej wpływa chropowatość powierzchni oraz wzajemne ukierunkowanie nierówności powierzchni trących – kąt współpracy (przecięcia) pomiędzy charakterystyczną kierunkowością danej powierzchni [53].

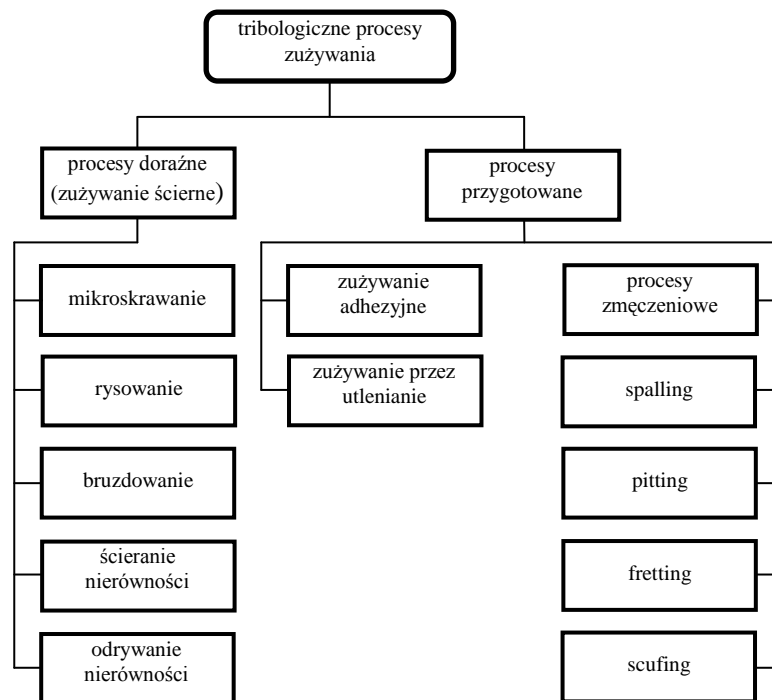
Przyczyny zużywania mają charakter czysto mechaniczny bądź mechaniczny połączony z chemicznym oddziaływaniem otaczającego ośrodka i jako podstawowe przyjmuje się [13, 30, 31]:

- odkształcenia sprężyste i plastyczne wierzchołków nierówności i ich zgniot,
- powstawanie na powierzchni tarcia warstewek tlenków, zapobiegających wprawdzie zacieraniu i głębokiemu wrywaniu cząsteczek materiału, ale ponieważ tlenki są kruche, łuszczące się i odpadające, to miejsca odsłonięte ulegają powtórnemu utlenianiu itd.,
- wbudowywanie się cząstek WW jednego materiału trącego w powierzchnię materiału drugiego, co podczas ślizgania powoduje rysy i zadrapania powierzchni, a w rezultacie niszczenie powierzchni o mniejszej twardości,
- adhezję połączeń stykających się powierzchni, która prowadzi do przyspieszającego zużywanie przenoszenia materiału z jednej WW na drugą,
- gromadzenie wodoru w warstwach wierzchnich części stalowych i żeliwnych powodujące zużywanie wodorowe [97].

Oddzielenie materiału w procesie zużywania jest wynikiem doraźnego, mechanicznego oddziaływania stykających się elementów, albo jest poprzedzone innymi zjawiskami, które powodują mechaniczne oddzielenie materiału elementu lub je ułatwiają. Mając te mechanizmy na uwadze procesy niszczenia można podzielić na [75]:

- przygotowane,
- doraźne.

Klasyfikację zużywania tribologicznego uwzględniającą mechanizm procesu niszczenia warstwy wierzchniej przedstawiona została na rysunku 2.10.



Rys. 2.10. Klasyfikacja zużywania tribologicznego [30,44]

Zużywanie ściernie powstaje wówczas, gdy proces niszczenia warstwy wierzchniej przyjmuje formę: rysowania, mikroskrawania, bruzdowania, ścinania nierówności, odrywania nierówności powierzchni lub obtaczania ziaren ściernych. Ubytek materiału WW w procesie zużywania ściernego jest wynikiem głównie oddziaływania mechanicznego. W obszar lub obszary tarcia współpracujących elementów dostają się twarde cząstki ciał obcych i zachowują się jak mikroostrza skrawające. Taką samą rolę mogą spełniać wystające nierówności twardszego materiału współpracujących powierzchni [30].

Mikroskrawanie polega na wykrawaniu w materiale określonej mikroobjętości wskutek skrawającego działania elementu ściernego. Oddzielony materiał ma postać wiórków.

Rysowanie polega na tworzeniu rysy w materiale elementu przez przemieszczający się występ elementu współpracującego lub ziarno ściernie, częściowo wskutek wykrawania, a częściowo przez odsuwanie materiału na boki. Jest to zjawisko pośrednie między mikroskrawaniem a mikrobruzdowaniem.

Mikrobruzdowanie polega na wgłębianiu się występu elementu w materiał elementu współpracującego i plastycznym wyciskaniu w nim mikrobruzd pod wpływem ruchu względnego.

Ścinanie nierówności występuje wówczas, gdy wartość siły niezbędnej do ścięcia występu jest mniejsza od wartości oporu odkształcenia współdziałającego występu lub mniejsza od wartości oporu jego przemieszczania w elemencie współpracującym. Spełnienie tych warunków zależy od kształtu nierówności powierzchni, wysokości zahaczeń i mechanicznych właściwości materiałów.

Odrywanie nierówności występuje przy zahaczaniu się występow elementu pary ciernej, gdy materiał występow (jednego lub obu) ma budowę niejednorodną.

Obtaczanie ziaren ściernych występuje wówczas, gdy w przestrzeń (luz) między współpracującymi elementami przedostaną się cząstki ściernie, które mają odpowiedni kształt i dużą wytrzymałość na ściskanie, wówczas może wystąpić ich obtaczanie. Spowoduje ono powstawanie wskutek odkształcenia plastycznego, mikrowgłębień z wypływkami materiału na brzegach. W wyniku wielokrotnego odkształcenia powodującego zmęczenie wypływki te zostają oddzielone w postaci cząstek zużycia.

Ścieranie jest najbardziej powszechnym rodzajem zużywania, obejmuje około 80÷90% wszystkich przypadków zużywania tribologicznego [13, 44]. Dominuje ono przy braku smarowania węzła ciernej – tarcie suche, lub gdy smarowanie jest niedostateczne – tarcie mieszane. W warunkach tarcia płynnego może wystąpić, gdy środek smarny zawiera cząstki ściernie (np. zanieczyszczenia lub produkty zużywania).

Zużywanie ściernie zależy od rodzaju, struktury oraz własności i właściwości materiałów elementów współpracujących, np. przyjmuje się, że ze wzrostem twardości zwiększa się odporność na zużywanie [13].

Zużywanie adhezyjne jest rezultatem rozrywania połączeń adhezyjnych powstałych w punktach rzeczywistego styku powierzchni, przy ich ruchu względnym. Warunkiem wystąpienia szczepiania jest zbliżenie współpracujących powierzchni na odległość mniejszą od zasięgu działania sił wiązań między atomami oraz brak warstw adsorbowanych lub tlenkowych, mających wiązania o charakterze niemetalicznym [13, 30, 44].

Proces ten występuje przy małych prędkościach względnych i dużych naciskach jednostkowych, przy niedostatecznym smarowaniu – tarcie mieszane, lub jego braku – tarcie suche.

Zasada działania zużywania przez utlenianie polega na adsorpcji tlenu w obszar tarcia i jego dyfuzji w odkształcone plastycznie i sprężyste mikroobjętości metalu, a następnie na usuwaniu powstałych w ten sposób warstewek tlenków na skutek tarcia. Jest to więc chemiczno–mechaniczna postać zużywania.

Zużywanie przez utlenianie jest dominującym procesem jeśli szybkość ciągłego procesu tworzenia się warstw tlenków, a następnie ich usuwania jest większa od innych procesów zużywania (np. ścierania).

Zużywanie zmęczeniowe polega na niszczeniu warstwy wierzchniej elementów w wyniku występowania cyklicznych naprężeń kontaktowych (sprężysto–plastycznych). Naprężenia kontaktowe wielocyklowe w WW powodują zmęczenie materiału, a następnie lokalną utratę spójności, co powoduje powstawanie i rozwój mikropęknięć, a w konsekwencji pęknięcia i ubytki materiału.

Proces zmęczenia może zachodzić w całej objętości elementu lub tylko w jego warstwie wierzchniej. W pierwszym przypadku występuje objętościowe zużywanie zmęczeniowe, w drugim zaś – powierzchniowe (stykowe). W niniejszej pracy, ze względu na jej tematykę rozważania ograniczono do drugiego przypadku.

Powierzchniowe zużywanie zmęczeniowe występuje przy współpracy ciał sprężystych o prostej i krzywoliniowej powierzchni tarcia lub o powierzchniach krzywoliniowych, stykających się punktowo lub liniowo, gdzie zachodzi poślizg z tarciem tocznym [13].

Do zużywania zmęczeniowego można zaliczyć następujące rodzaje zużywania [13, 30, 44]:

- łuszczenie (spalling),
- pitting,
- fretting,
- scuffing.

Łuszczenie (spalling) polega na oddzielaniu się materiału w postaci łusek w wyniku cyklicznych naprężeń kontaktowych. Występuje przy braku smarowania (tarcie suche) niekiedy także przy niedostatecznym smarowaniu (tarcie mieszane) podczas toczenia. Procesowi temu towarzyszy zazwyczaj utlenianie się materiału w warstewce przypowierzchniowej.

Pitting polega na niszczeniu warstwy wierzchniej w wyniku cyklicznych naprężeń kontaktowych przy fizykochemicznych oddziaływaniach substancji smarującej, objawiające się w formie miejscowych ubytków materiału.

Fretting (zużywanie ścierno–korozyjne) polega na niszczeniu warstwy wierzchniej w postaci miejscowych ubytków materiału elementów poddanych działaniu drgań lub niewielkich poślizgów przy ruchu postępowo–zwrotnym, w wyniku cyklicznych naprężeń kontaktowych oraz intensywnego oddziaływania środowiska korozyjnego.

Scuffing (zużywanie ścierno–adhezyjne) to zużywanie występuje jako łączny skutek oddziaływania procesów zużywania ściernego i adhezyjnego prowadzących do zacierania.

2.3. Środki smarowe i dodatki uszlachetniające

Środki smarowe są to substancje wprowadzane między współpracujące powierzchnie trące w celu zmniejszenia skutków procesu zużywania, m.in. oporów tarcia. Ich głównym zadaniem jest wyeliminowanie tarcia suchego ze skojarzeń trących. Środki smarowe zbudowane są z bazy smarowej stanowiącej niejako fundament oraz dodatków uszlachetniających. Rodzaj dodatków oraz

ich proporcje zdeterminowane są przeznaczeniem danego środka smarowego. Do grupy dodatków uszlachetniających zalicza się:

- dodatki przeciwkorozyjne,
 - inhibitory korozji,
 - inhibitory utleniania,
 - inhibitory rdzewienia,
 - deaktywatory metali,
- depresatory,
- dodatki przeciwstarzeniowe,
- dodatki przeciwpienne,
- dodatki smarnościowe,
- dodatki dyspergujące,
- dodatki myjące (detergenty),
- dodatki wiskozowe (poprawiające wskaźnik lepkości).

W grupie dodatków przeciwkorozyjnych zostały wyżej wymienione cztery rodzaje dodatków, które mimo że należą do tej samej grupy, różnią się jednak mechanizmem działania. Poniżej opisane zostały dwie z nich.

Inhibitory utlenienia - zapobiegają łańcuchowym i katalitycznym reakcjom utleniania, redukują nadtlarki organiczne, hamują procesy tworzenia się kwasów, żywic, osadów i szlamu. Są one używane w szerszym zakresie niż inne dodatki uszlachetniające. Ich zadanie to spowolnienie rozkładu oleju bazowego przez utlenianie. Działają one poprzez rozkład wodoronadtlenków, utworzonych w reakcji tlenu z węglowodorami, albo wolnych rodników nadtlenkowych.

Olej smarowy lub smar plastyczny w czasie pracy jest w kontakcie z tlenem powietrza, a wysoka temperatura i katalityczne właściwości metalu powierzchni tarcia stwarzają dobre warunki do utleniania oleju. Zachodzą złożone reakcje utleniania, które są autokatalityczne. Produkty utleniania zwiększają lepkość oleju, powstają kwaśne zanieczyszczenia o właściwościach korozyjnych oraz osady typu żywic, laków i polimerów. Inhibitory utlenienia przeciwdziałają tworzeniu w/w produktów.

Inhibitory rdzewienia - cząsteczki polarne tych dodatków mocno przylegające do powierzchni metalu tworzą warstwę odporną na działanie wody; reagując z metalem w warunkach tarcia tworzą nową warstwę wierzchnią, bardziej odporną na zużywanie.

Przykładowe typy tych związków chemicznych to: fosforany aminowe, sodowe, wapniowe, sulfoniany naftowe, alkilowane kwasy bursztynowe, kwasy tłuszczowe, dwualkilodwutiofosforany cynku, trójkrezylofosforany.

Depresatory - obniżają temperaturę krzepnięcia przez otaczanie zarodków kryształów węglowodorów parafinowych cząsteczkami depresatora. Podczas ich krystalizacji tworzą one zamknięte, siatkowe struktury przestrzenne, które adsorbują polimer i tworzą masę podobną do żelu. Depresatory pokrywają małe kryształy parafiny cienką błonką, nie dopuszczając do łączenia się ich w większe skupiska, tworząc w ten sposób strukturę szkieletową, która utrudnia płynięcie oleju. Depresatory nie wstrzymują krystalizacji stałych

węglowodorów, lecz powodują powstawanie skrajnie małych i nieposiadających zdolności kohezyjnych kryształów, które nie tworzą dużych konglomeratów. Masy cząsteczkowe depresatorów wg [84] są znacznie mniejsze niż dodatków lepkościowych, zwykle w zakresie od 500 do 100 000 Da.

Dodatki przeciwstarzeniowe - zadaniem ich jest stabilizacja możliwie wszystkich pozytywnych cech środka smarowego.

Przykładowe typy tych związków chemicznych: pochodne fenoli, fenyloaminy.

Dodatki przeciwpienne - zapobiegają tworzeniu się piany przez zmianę napięcia powierzchniowego. Dodatki te tworzą na powierzchni oleju cieniutką warstwę, nie pozwalającą na utrzymanie się piany w oleju. Jako dodatki przeciwpienne stosowane są oleje silikonowe, dodawane w ilości tysięcznych części procentu.

Przykładowe typy tych związków chemicznych: polimery silikonowe.

Dodatki smarnościowe - w warunkach tarcia ulegają rozpadowi i reagują z metalem, tworząc nowe związki (siarczki, chlorki), które łatwiej ulegają ścinaniu niż metal podstawowy. Uczestniczą w reakcjach tribochemicznych w zakresie najszerszym spośród wszystkich dodatków uszlachetniających. Dodatki te dzielimy na:

- a) przeciwzatarciowe,
- b) przeciwzużyciowe,
- c) modyfikatory tarcia.

Dodatki przeciwzatarciowe, zwane dodatkami EP (Extreme Pressure), są organicznymi związkami chemicznymi, które przeciwdziałają nadmiernemu zużyciu powierzchni tarcia w czasie smarowania. Dodatki te w swojej cząsteczce zawierają jeden lub więcej heteroatomów, takich jak siarka, fosfor lub chlor. Funkcje przeciwzatarciowe posiada również grupa karboksylowa, czy to w postaci kwasu czy też soli. Wszystkie te związki w trudnych warunkach tarcia granicznego i mieszanego reagują z metaliczną powierzchnią tarcia tworząc prosty związek nieorganiczny. Utworzone związki nieorganiczne (siarczek, fosforan, tiofosforan, chlorek) mają mniejszą od metalu wytrzymałość na ścinanie i przeciwdziałają ścieraniu adhezyjnemu powierzchni tarcia (zespawaniu powierzchni styku tarcowego).

Związkami chemicznymi efektywnie działającymi jako dodatki EP są siarkowane: tłuszcze, węglowodory, estry metylowe nienasyconych kwasów tłuszczowych oraz terpeny. Zaliczamy do nich ponadto alifatyczne i aromatyczne sylfidy, organiczne fosforyny i fosforany, fosforany amoniowe, fosforosiarkowane węglowodory, dialkilo(arylo)ditiiofosforany i dialkilo-ditiokarbaminiany metali oraz chlorowane parafiny, chlorosiarkowane oleje tłuszczowe oraz naftenian ołowiu.

Siarkowane substancje chemiczne posiadają w swojej cząsteczce wiązania sulfidowe składające się z jednego lub większej liczby atomów siarki. Są to mono-, di-, tri- (i więcej) sulfidy. Ze wzrostem liczby atomów siarki w wiązaniu sulfidowym powyżej dwóch, znacznie rośnie reaktywność

chemiczna tych substancji z powierzchnią tarcia i stają się one wtedy korozyjne. W wyniku siarkowania węglowodorów tworzą się w cząsteczce związku mostki siarkowe.

Z disulfidów organicznych najlepsze własności EP wykazuje disulfid dibenzylowy, a przeciwzużyciowe – disulfid difenyłowy.

Olej syntetyczny typu estru kwasu fosforowego z fenolami stosowany jest jednocześnie jako dodatek EP przeciwzużyciowy.

Jako dodatki przeciwzatarciowe stosowane są również fosforyny. Dobrymi dodatkami przeciwzatarciowymi są także wielofunkcyjne dodatki – dialkilditio-karbaminiany ołowiu lub antymonu.

Dodatki przeciwzużyciowe zmniejszają zużycie powierzchni tarcia przy umiarkowanych obciążeniach. Najszerszej stosowane są dialkilo(arylo)-ditiofosforany cynku, fosforany trójkrezolu, fosforany, tiofosforyny, siarkowane węglowodory, dialkilditio-karbaminiany cynku oraz kompleksy dwurdzeniowe tiooksomolibdenu.

Dodatki przeciwzużyciowe w kontakcie i reakcji z metalem powierzchni tarcia tworzą warstwy adsorpcyjne i związki reakcyjne, zmniejszają opory tarcia, w wyniku czego uzyskuje się również zmniejszenie zużycia.

Dodatki zmniejszające współczynnik tarcia działają na zasadzie zwiększenia trwałości zaadsorbowanej fizycznie warstwy powierzchniowej. Wysokopolarne cząsteczki dodatków adsorbują się na powierzchni tarcia i pozostają tam w czasie procesu tarcia, zapobiegając stykowi metal-metal. Do dodatków zmniejszających tarcie (modyfikatory tarcia) należą głównie kwasy i aminy tłuszczowe, tłuszcze oraz niektóre sole ditiofosforanów, N-acylosarkozydy i ich pochodne, mieszaniny kwasów organofosforowych i tłuszczowych.

Przykładowe typy tych związków chemicznych: siarkowane oleje roślinne lub zwierzęce, chlorowane węglowodory, sole ołowiowe kwasów organicznych, chlorowana siarka, estry kwasów tłuszczowych, związki fosforu.

Dodatki dyspergujące - hamują one tworzenie się szlamu, otaczają cząsteczki zanieczyszczeń, zapobiegają ich aglomeracji i wydzielaniu. Dodatki te mają dobre właściwości rozpraszające (dyspergujące). Ich cząsteczki, podobnie jak detergenty, zbudowane są z długiego łańcucha węglowodorowego zapewniającego dobrą rozpuszczalność dodatku w oleju, do którego dołączona jest grupa polarna. Grupa polarna zawiera jeden lub więcej heteroatomów azotu, tlenu, czasem fosforu, nie zawiera metali, stąd są to dodatki bezpopiołowe. Najszerszej stosowane są dodatki z heteroatomem azotu, jak alkilomono- i bis-imidy kwasu bursztynowego.

Dodatki rozpraszające, adsorbując się grupą polarną na powierzchni stałych zanieczyszczeń oleju, przeciwdziałają ich łączeniu się w większe aglomeraty i w ten sposób tworzą ich trwałą zawiesinę.

Przykładowe typy tych związków chemicznych: bursztynoimidy, metakrylany, polimery zawierające azot, polimetakrylany, aminy wielkocząsteczkowe, amidy, sulfoniany barowe, wapniowe.

Dodatki myjące (detergenty) - regulują one procesy tworzenia się aglomeracji osadów, zapobiegają odkładaniu się osadów, utrzymują je np. w postaci zawiesiny. Są to związki organiczne o właściwościach powierzchniowo czynnych. Stosowane w olejach detergenty zmniejszają ich napięcie powierzchniowe i temperatury rozkładu niektórych dodatków uszlachetniających. Są one też dodatkami przeciwzuzyciowymi oraz inhibitorami rdzewienia, a sole sodowe używane są jako emulgatory oleju w wodzie w produkcji cieczy chłodząco-smarujących.

Budowa chemiczna dodatków myjących jest typowa dla środków powierzchniowo-czynnych. Cząsteczka detergentu składa się z hydrofobowego długiego łańcucha węglowodorowego i polarnego końca cząsteczki.

Najczęściej stosowane dodatki myjące to obojętne i zasadowe sulfoniany i fenolany metali (wapnia i magnezu).

Dodatki poprawiające wskaźnik lepkości (dodatki wiskozowe) - zadaniem ich jest zmniejszenie wpływu temperatury na zmianę lepkości.

Wszystkie dodatki lepkościowe są związkami wielkocząsteczkowymi. Najbardziej rozpowszechnionymi są:

- poliizobutyleny,
- polimetakrylany i poliakrylany (estry alkoholi posiadających od 4 do 8 atomów węgla w cząsteczce),
- kopolimery olefinowe (kopolimery etylenowo-propylenowe, kopolimery ety-lenu, propylenu i heksadienu),
- polistyren,
- kopolimery styrenowo-dienowe.

W niskich temperaturach cząsteczki polimerów skrócone spiralnie są zawieszane w oleju i znajdują się w nim w stanie koloidalnym. W temperaturach wyższych rozpuszczają się w oleju i następuje rozprostowanie ich łańcuchów na całą długość. Zwiększa się w ten sposób powierzchnia styku dodatek – olej, hamując ruchliwość oleju i zwiększając wewnętrzne tarcie między jego cząsteczkami, co powoduje zwiększenie lepkości i wskaźnika lepkości.

Efekt działania dodatków lepkościowych zależy od ich zawartości w oleju, masy cząsteczkowej oraz właściwości oleju bazowego. Masa cząsteczkowa dodatków mieści się w zakresie 50 000÷1000 000 Da. Ze wzrostem masy cząsteczkowej dodatku efektywność zwiększania wskaźnika lepkości oleju rośnie, natomiast jego odporność na ścinanie maleje. Zmniejszenie wymiarów cząsteczek polimerów, w wyniku ich ścinania oraz występujących w styku tarciovym:

- procesów utleniania,
- podwyższonej temperatury,
- hydrolizy,

pogarsza właściwości dodatku. Dlatego niektóre polimery, jako dodatki lepkościowe, stosowane są w obecności innych dodatków, które zwiększają ich chemiczną stabilność.

Kopolimery zawierające grupy karboksylowych estrów oraz jedną lub więcej polarnych grup, takich jak:

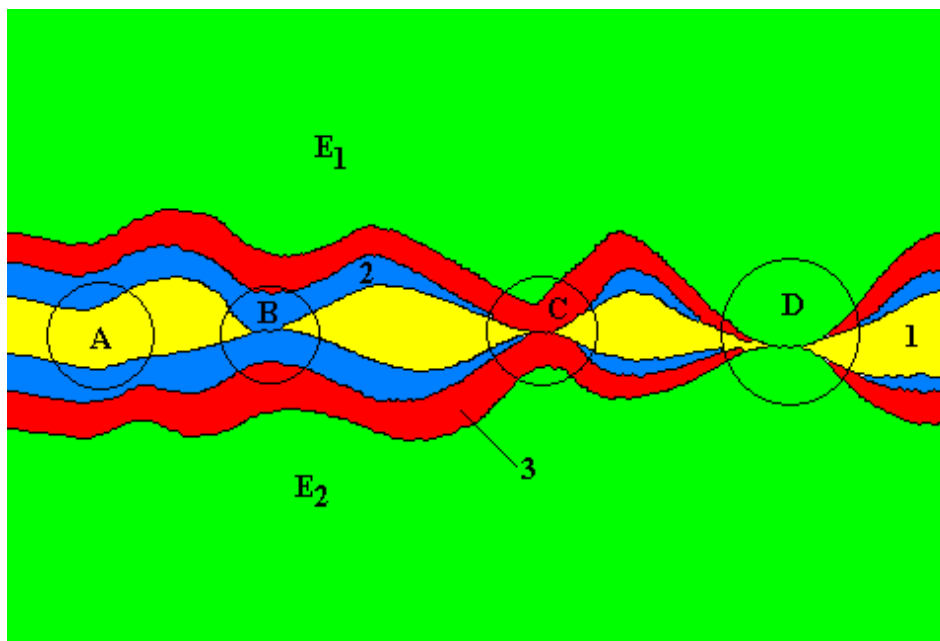
- amidowa,
- eterowa
- hydroksylowa,
- aminowa,
- epoksydowa,
- fosforoestrowa,
- karboksylowa,
- karboksylowa – bezwodnikowa albo nitrylowa,

posiadają właściwości dyspergujące i lepkościowe. Dodatki lepkościowe mogą również obniżyć temperaturę krzepnięcia metalu.

2.4. Preparaty eksploatacyjne

W eksploatacji maszyn i urządzeń dąży się do tego, aby węzły tarcia pracowały w warunkach tarcia płynnego lub co najmniej tarcia granicznego.

Środki smarowe – oleje handlowe, pomimo swych licznych zalet, do których należy zaliczyć między innymi zdolność odprowadzenia ciepła i produktów zużycia ze strefy tarcia, tłumienia drgań, ochrona przed korozją i inne, nie rozwiązują problemów smarowania w warunkach ekstremalnych obciążeń lub temperatur, nie likwidują tzw. zimnego startu (zimnego rozruchu silnika, przekładni, węzła tarcia). Powstała więc idea wprowadzenia do danego węzła tarcia wraz z olejem preparatu eksploatacyjnego (PE), mogącego łagodzić tego rodzaju warunki poprzez poprawę jakości warstwy granicznej zdolnej do przenoszenia zarówno większych obciążeń jak również odpornej na przerywanie. PE jest to substancja złożona w swej budowie. Zawiera zazwyczaj bazę olejową z kompleksem różnorodnych dodatków, m. in. smarnościowych, przeciwstarzeniowych i innych. Mechanizm działania PE najogólniej można przedstawić następująco. Cząsteczki PE transportowane są przez ciecz smarującą do węzłów tarcia, gdzie w wyniku procesu adsorpcji – fizycznej lub chemicznej, w sposób trwały wiążą się z powierzchniami metalicznymi ze sobą współpracującymi. Na powierzchniach węzła tarcia powstaje w ten sposób nowy film smarujący lub zastępcza warstwa graniczna. W przypadku niedosmarowania w miejscach lokalnych styków powierzchni metalicznych cząsteczki PE przejmują rolę filmu smarnego. W tym momencie współczynnik tarcia ulega gwałtownemu zmniejszeniu do wartości charakterystycznych dla tarcia płynnego. Efektywność oddziaływania zastępczej warstwy granicznej w mikroobszarach styku współpracujących ze sobą powierzchni zależna jest od intensywności procesów adsorpcji w mikroobszarach styku. Model węzła tarcia z zastosowaniem PE przedstawiono na rys. 2.11.



Rys. 2.11. Model węzła tarcia z zastosowaniem preparatów eksploatacyjnych:

E1, E2 – elementy pary tarczej; 1 – środek smaru wzbogacony preparatem eksploatacyjnym, 2 – właściwa warstwa graniczna (utworzona w wyniku stosowania środka smarnego), 3 – zastępcza warstwa graniczna; A - faza tarcia płynnego, B - faza tarcia granicznego-go, C - faza tarcia granicznego z udziałem zastępczej warstwy granicznej, D – faza tarcia suchego [41]

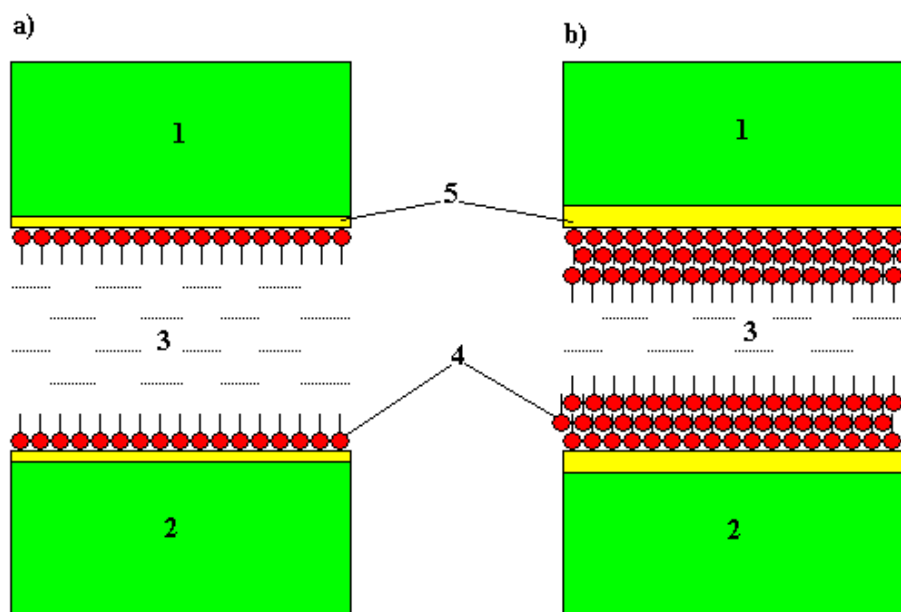
Z uwagi na to, że PE mają różne mechanizmy działania, można klasyfikować je wg tego mechanizmu. W pracy [41] autor dzieli je na trzy zasadnicze grupy:

- o działaniu chemicznym,
- zawierające w swym składzie określone cząsteczki środków smarnych stałych takich jak np. teflon, metale miękkie, grafit i inne,
- umożliwiające powstanie w węźle tarcia smarowania na zasadzie tzw. przenoszenia selektywnego (PS).

2.4.1. Preparaty o działaniu chemicznym

Do preparatów tych zaliczamy związki zawierające m.in. siarkę, chlor, wzbogacone dodatkowo tlenem, cynkiem, borem, selenem. Wchodzą one w reakcję z podłożem metalicznym. Dzięki dyfuzji składników tych dodatków do warstwy wierzchniej, na powierzchni metalu tworzą się ochronne warstewki fosforanów, siarczków itp. W ten sposób uzyskuje się równocześnie „mocną” warstwę graniczną oleju dzięki chemisorpcji oraz dodatkowe zabezpieczenie w postaci warstewki dyfuzyjnej. Tak utworzona warstewka

przypowierzchniowa, regenerująca się w czasie pracy węzła tarcia, charakteryzuje się dużą odpornością na przenoszenie obciążeń mechanicznych, zmniejszonym współczynnikiem tarcia oraz zwiększoną odpornością na zużywanie (zatarcie). Model węzła tarcia smarowanego olejem z dodatkiem PE o działaniu chemicznym przedstawiono na rys. 2.12.

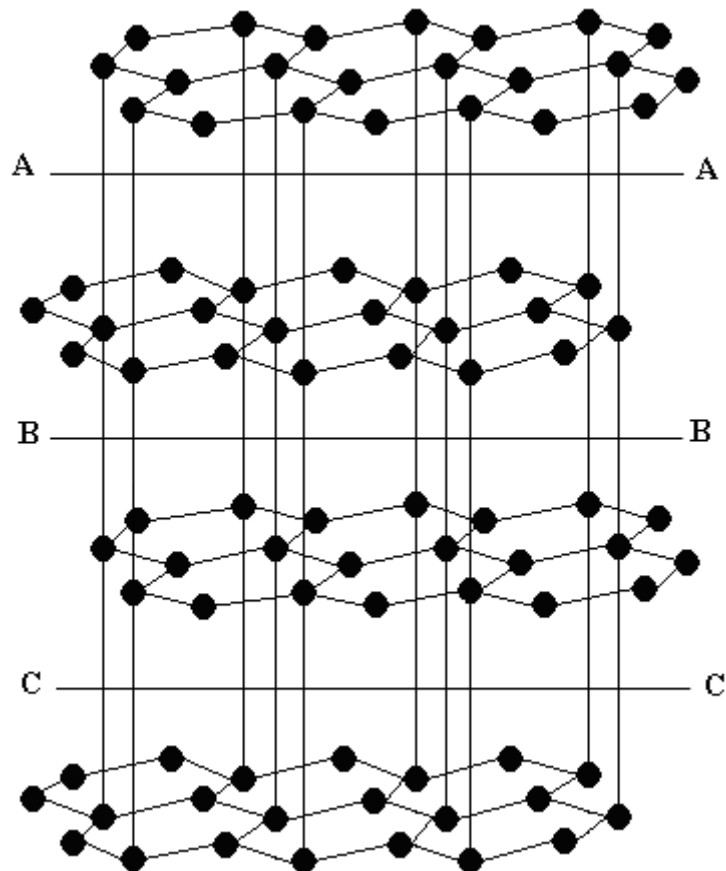


Rys. 2.12. Model węzła tarcia smarowanego: a) olejem bazowym, b) olejem wzbogaconym preparatem eksploatacyjnym o działaniu chemicznym; 1, 2 – elementy trące, 3 – środek smarowy, 4 – warstwa graniczna utworzona w wyniku sorpcji fizycznej, 5 – warstwa graniczna utworzona w wyniku chemisorpcji [41]

2.4.2. Preparaty z cząsteczkami środków smarowych stałych

Do środków smarowych stałych zaliczyć można m.in. grafit lub dwusiarczek molibdenu, których budowa i działanie zostało omówione poniżej. Ze względu na trudności ich efektywnej aplikacji substancje te są najczęściej stosowane w preparatach jako dodatki smarowe.

Grafit jest przykładem struktury, w której występują wiązania różnego typu. Istnienie silnych wiązań kowalencyjnych między atomami węgla w warstwach oraz słabych – metalicznych między warstwami, ułatwia poślizg w płaszczyznach spójności grafitu – rys. 2.13.



Rys. 2.13. Struktura grafitu, A-A, B-B, C-C – ślady płaszczyzn poślizgu [40]

Istotę smarowania grafitem wyjaśniają dwie teorie: strukturalna i adsorpcyjna. Teoria strukturalna przypisuje własności smarne warstwowej budowie siatki krystalicznej, natomiast teoria adsorpcyjna – adhezji smaru do powierzchni metalu. Występowanie dużych odległości między warstwami węgla jest przyczyną słabego oddziaływania międzyatomowego (małe siły van der Waalsa). Wskutek tego ułatwione jest wzajemne przemieszczanie się tych warstewek w kryształach po płaszczyznach poślizgu (teoria strukturalna). Równocześnie grafit wykazuje dobre właściwości smarne dzięki adsorpcji wody. Zaadsorbowane cząsteczki wody na głównych płaszczyznach poślizgu zmniejszają adhezję między nimi i tym samym zmniejszają współczynnik tarcia podczas ich przesuwania (teoria adsorpcyjna). Należy jednak przypuszczać, że dobre własności smarne uzyskuje się wówczas, gdy spełnione są obydwa warunki, tzn. środek smarny wykazuje budowę warstwową, a ponadto posiada dobre własności adhezyjne.

Dwusiarczek molibdenu również posiada strukturę warstwową. Występują w niej trójwarstwowe pakiety - warstwy atomów molibdenu i dwie warstwy siarki. Istnienie silnych wiązań kowalencyjnych między atomami Mo-S oraz

słabych (van der Waalsa) między atomami siarki S-S, umożliwia łatwy poślizg warstw siarka-siarka. Mechanizm działania smarnego dwusiarczku molibdenu jest podobny do mechanizmu smarowania grafitem. Różnica polega na tym, że tworzenie cienkiej warstewki, przylegającej bezpośrednio do powierzchni metalu, zachodzi nie tylko w wyniku adsorpcji fizycznej lecz także chemisorpcji wywołanej reakcją chemiczną jonów siarki z atomami metalu. Po wytworzeniu tej warstewki w dalszej kolejności następuje wypełnienie wgłębień nierówności cząsteczkami dwusiarczku molibdenu dotąd, aż poślizg znacznie zachodzić między warstewkami MoS₂.

Zmniejszenie tarcia i zużycia powierzchni współpracujących można uzyskać również przez wprowadzenie do węzła tarcia kulistych cząstek teflonu (PTFE) – stałego środka smarnego o małej wewnętrznej spójności. PTFE może być trwale naładowany elektrycznie dodatnio lub może być elektrycznie obojętny. W pierwszym przypadku w wyniku oddziaływania elektrostatycznego preparaty PTFE przyciągane są do powierzchni metalowej i następuje fizykochemiczne wiązanie PTFE-metal. Cząsteczki PTFE, zaadsorbowane w postaci warstewek na powierzchni metali, posiadają z reguły większe rozmiary niż mikronierówności tych powierzchni elementów. W sytuacji zmniejszenia odległości między powierzchniami współpracujących elementów, cząsteczki PTFE ulegają rozwalcowywaniu. Następuje tzw. „szpachlowanie” powierzchni. Powstałe warstewki mają bardzo dużą przyczepność do współpracujących powierzchni.

W drugim przypadku – gdy cząsteczki PTFE są elektrycznie obojętne – obserwuje się brak zdolności tworzenia na współpracujących powierzchniach metalowych warstewek o opisanej wcześniej trwałości.

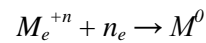
2.4.3. Preparaty umożliwiające smarowanie na zasadzie tzw. przenoszenia selektywnego (PS)

Efekt przenoszenia selektywnego oparty jest na zjawisku tribologicznym, w wyniku którego na powierzchniach trących tworzy się plastyczna, cienka, nie utleniająca się warstewka o specyficznej strukturze. Powstaje ona wtedy, gdy w parze trącej w danych warunkach nie występuje tarcie płynne, a mimo to wartość współczynnika tarcia i równocześnie intensywność zużywania zmniejsza się o 2÷3 rzędy.

Istotę działania mechanizmu przenoszenia selektywnego wyjaśniają dwie hipotezy:

- mechanizm oparty na mikroadhezyjnym szepianiu cząstek metalu miękkiego z powierzchnią tarcia metalu twardego. W stadium początkowym tworząca się warstewka ochronna ma skład metalu miękkiego. W przypadku stworzenia warunków sprzyjających procesowi przenoszenia selektywnego skład ten może ulegać zmianie. Warstewka może wzbogacać się o składniki katodowe w wyniku selektywnego rozpuszczania, np. miedzi, gdy metalem miękkim są jej stopy [26];

- mechanizm, wg którego tworzenie metalicznej warstewki ochronnej jest wynikiem procesu elektrochemicznego typu:



Tworząca się warstewka zawiera tylko jeden metal wprowadzony w formie dodatku metalizującego do środka smarnego lub nanoszonego na powierzchnię tarcia w wyniku reakcji składników substancji smarowej z powierzchnią zawierającą ten metal – w postaci składników stopowych, pokrycia lub warstewek. W przypadku stopów miedzi – przenoszeniu ulega miedź [49, 50].

Podsumowanie

Synteza powyższych informacji pozwala na stwierdzenie, że stosując dodatki uszlachetniające w zależności od przeznaczenia danej kompozycji smarowej, możliwe jest sterowanie jej właściwościami, uwypuklające te cechy, które są najważniejsze z punktu widzenia eksploatacji.

3. PODSUMOWANIE STUDIUM LITERATUROWEGO

3.1. Wnioski z analizy literatury, hipoteza naukowa

W wyniku przeprowadzonego studium literaturowe zebrano zbiór informacji o warstwie wierzchniej elementów par kinematycznych oraz dodatkach uszlachetniających środki smarowe. Przedstawiono w nim kompleksowe ujęcie warstwy wierzchniej, od jej opisu, określenia wielkości charakteryzujących stan WW, do opisanie zmian zachodzących w poszczególnych fazach jej istnienia. Scharakteryzowano również cechy grupy dodatków uszlachetniających.

Na podstawie przeprowadzonej analizy dostępnej literatury stwierdzono, że od cech dodatków smarowych zależą skutki procesów zużywania, a w konsekwencji trwałość całego obiektu technicznego.

Do opisu stanu WW i zachodzących w niej zmian najczęściej przyjmuje się parametry opisujące strukturę geometryczną powierzchni, a wśród nich różne parametry chropowatości [80]. Są one bez wątpienia istotne i to zarówno dla styku konforemnego jak i niekonforemnego powierzchni współpracujących, ale nie w pełni charakteryzują WW i stąd nie ujmują wszystkich zmian zachodzących w obszarze styku.

Przeprowadzona analiza informacji literaturowych wykazała, że dla procesu zużywania istotnym elementem jest rodzaj stosowanych uszlachetniających dodatków smarowych.

Stwierdzono, że w źródłach literaturowych najmniej informacji dotyczy relacji między przebiegiem zużywania i zmianami stanu WW a rodzajami dodatków uszlachetniających. Analizując proces zużywania elementów par kinematycznych z konforemnym ich stykiem i jego intensywność, stwierdzono, że istotny w tym zakresie jest dobór odpowiednich smarowych dodatków uszlachetniających, zarówno w aspekcie jakościowym jak i ilościowym.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury można określić aktualny stan badań i kierunki w jakich one zmierzają. Do najistotniejszych trendów zaliczyć można:

1. Rozszerzanie wiedzy o mechanizmach elementarnych występujących w procesie zużywania.
2. Określenie związków między intensywnością procesu zużywania a rodzajem i stężeniem dodatku uszlachetniającego.
3. Opracowanie ujednoczonych metod badawczych umożliwiających porównanie uzyskiwanych wyników i uogólnianie dokonanych spostrzeżeń.

Podejmowana więc w niniejszej pracy problematyka jest spójna z aktualnymi tendencjami w badaniach tribologicznych [3, 8, 32, 38, 91].

W wyniku przeprowadzonego studium literaturowego sformułowano poniższą hipotezę naukową:

Na intensywność procesu zużywania podczas współpracy par kinematycznych ze stykiem konforemnym istotny wpływ mają dodatki smarowe – ich kompozycja i stężenie.

Jej zweryfikowanie przyczyni się do uzupełnienia wiedzy w obszarach zidentyfikowanych na podstawie dokonanej syntezy informacji literaturowych.

W celu zweryfikowania powyższej hipotezy zrealizowano pełny cykl badań eksperymentalnych. Przeprowadzono je na zmodernizowanym w tym celu stanowisku badawczym.

Wyniki studium literaturowego pozwalają dokonać oceny stanu wiedzy z zakresu WW i jej transformacji oraz wytyczyć obszar wiedzy, który zdaniem autora należy uzupełnić. Rozszerzy się w ten sposób istniejąca już wiedzę z tego zakresu, będzie można zweryfikować i uogólnić istniejące już spostrzeżenia oraz poprawność wniosków.

3.2. Cel i zakres pracy

Głównym celem poznawczym pracy jest stwierdzenie istnienia relacji między intensywnością procesu zużywania w obecności badanego rodzaju dodatku a wybranymi parametrami opisującymi strukturę geometryczną powierzchni oraz jakościowe określenie tych relacji. Tym samym zostanie zweryfikowana hipoteza.

Osiągnięcie powyższego celu wymaga przeprowadzenia badań eksperymentalnych przy przyjętym na podstawie analizy literatury zbiorze wymuszeń zewnętrznych, dla różnych preparatów eksploatacyjnych.

Dla realizacji założonego celu, zakresem pracy objęto:

1. Ocena stanu analizowanego zagadnienia, na podstawie informacji literaturowych z zakresu wpływu dodatków smarowych na intensywność zużywania.
2. Zmodernizowanie stanowiska badawczego, za pomocą którego można przeprowadzić badania eksperymentalne, wg założonego modelu badań.
3. Wykonanie własnych badań eksperymentalnych, podzielonych na badania wstępne i zasadnicze. Wyniki badań wstępnych posłużą do weryfikacji poprawności przyjętej metodyki badań oraz działania stanowiska badawczego. Natomiast wyniki badań zasadniczych wykorzystane będą do weryfikacji hipotezy naukowej.
4. Zweryfikowanie osiągnięcia założonego celu, poprzez sprawdzenie czy kryterium osiągnięcia celu zostało spełnione, przy czym kryterium tym będzie stwierdzenie istnienia relacji oraz ich jakościowe określenie.

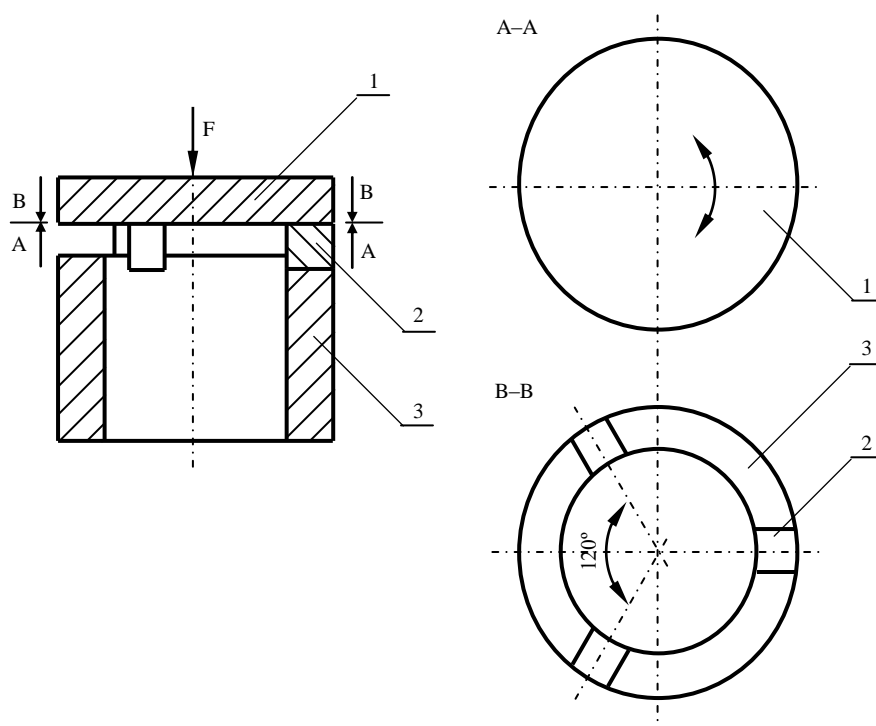
4. BADANIA WŁASNE

4.1. Badania wstępne

4.1.1. Zasada pomiarów

W celu potwierdzenia istotności wpływu dodatków smarowych na intensywność procesu zużywania w parze kinematycznej ze stykiem konforemnym, przed rozpoczęciem badań głównych wykonano badania wstępne. Badania te miały dać odpowiedź przede wszystkim na pytanie, czy i w jakim stopniu dodatek smarowy ma wpływ na intensywność procesu zużywania.

W tym celu zmodernizowano stanowisko badawcze istniejące w laboratorium Zakładu Inżynierii Produkcji Wydziału Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy. Na rysunku 4.1 przedstawiono ogólną zasadę współpracy pary kinematycznej – próbki z przeciwpróbką w trakcie badań, realizowanych na wspomnianym stanowisku. Jego budowę i działanie szczegółowo opisano w podrozdziale 4.3.



Rys. 4.1. Schemat współpracy próbek z przeciwpróbką: 1 – przeciwpróbka, 2 – próbka, 3 – podstawa do mocowania próbek

Na powierzchni czołowej tulei ustalającej próbki (3), mocuje się nieruchomo badane próbki (2) w trzech rowkach, które są wykonane co 120° . Uzyskuje się w ten sposób trójpowierzchniowy, równomiernie rozłożony docisk współpracujących elementów, który realizowany jest poprzez napięcie sprężyny. Oscylacyjny ruch względny wykonuje przeciwpróbka (1).

4.1.2. Warunki i zakres badań

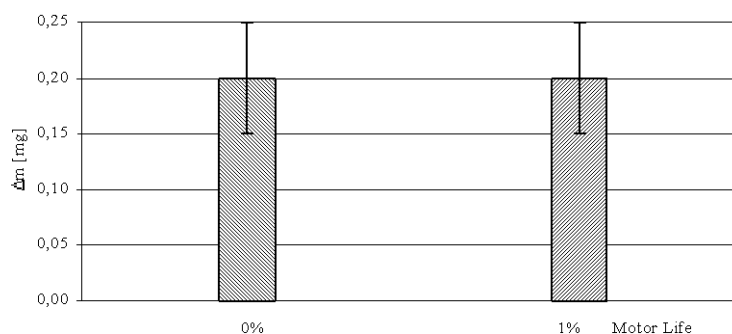
Na podstawie analizy informacji literaturowych dokonano wyboru warunków badań wstępnych. Badania te przeprowadzono dla ulepszonej stali C45 o twardości 40 HRC, przeciwpróbka wykonana była ze stali 102Cr6 zahartowanej do twardości 60 HRC. Twardość przeciwpróbki zdecydowanie przewyższa (o 50 %) twardość próbek, po to aby zmiany stanu SGP występowały przede wszystkim w WW próbek. Próbki z przeciwpróbką współpracowały przy obciążeniu zewnętrznym wynoszącym 600 N, co przy powierzchni styku próbek z przeciwpróbką wynoszącą 300 mm^2 , odpowiada teoretycznym naciskom w strefie styku 2,0 MPa. Prędkość ruchu względnego podczas badań wynosiła 9,6 m/min (0,16 m/s), a próbki pracowały w środku smarującym jakim był olej bazowy SN-150 bez dodatków i z 1% dodatkiem preparatu eksploatacyjnego Motor-Life.

Jako wielkości opisujące zmiany zachodzące w WW przyjęto bezwzględny ubytek masy próbek jako bezpośrednia miara zużycia oraz zmiany wartości parametru chropowatości Ra jako parametru najczęściej stosowanego w praktyce przemysłowej. Rejestrowano również zmiany temperatury w komorze olejowej oraz pobór mocy elektrycznej przez silnik.

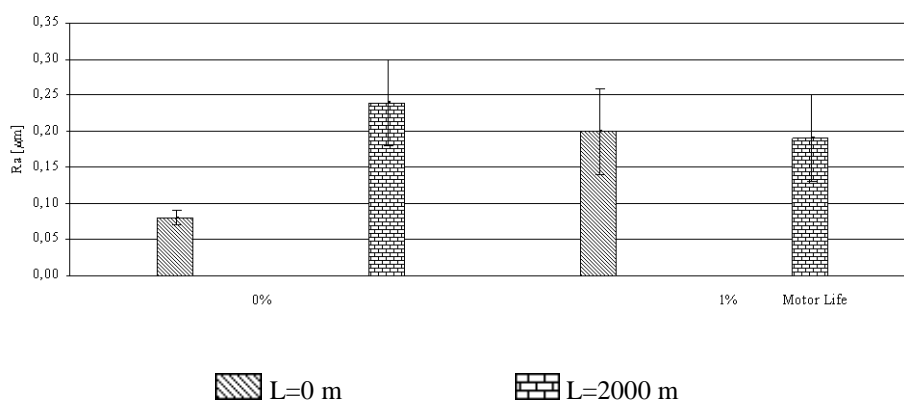
Wartość parametru chropowatości Ra oraz masa próbek mierzona była przed i po badaniu.

4.1.3. Wyniki badań

Uśrednione wyniki badań przedstawiono w postaci wykresów. Na rysunku 4.2 przedstawiono ubytek masy próbek Δm , na rysunku 4.3 – zmianę wartości parametru chropowatości Ra , na rysunku 4.4 – zmianę temperatury T w komorze olejowej, natomiast na rysunku 4.5 – średni pobór mocy czynnej P . Zmiany wszystkich tych wielkości odniesione były do zrealizowanej drogi tarcia $L = 2000 \text{ m}$, gdyż wg informacji literaturowych po takiej jej wartości następuje stabilizacja wielkości charakteryzujących proces zużycia [53].

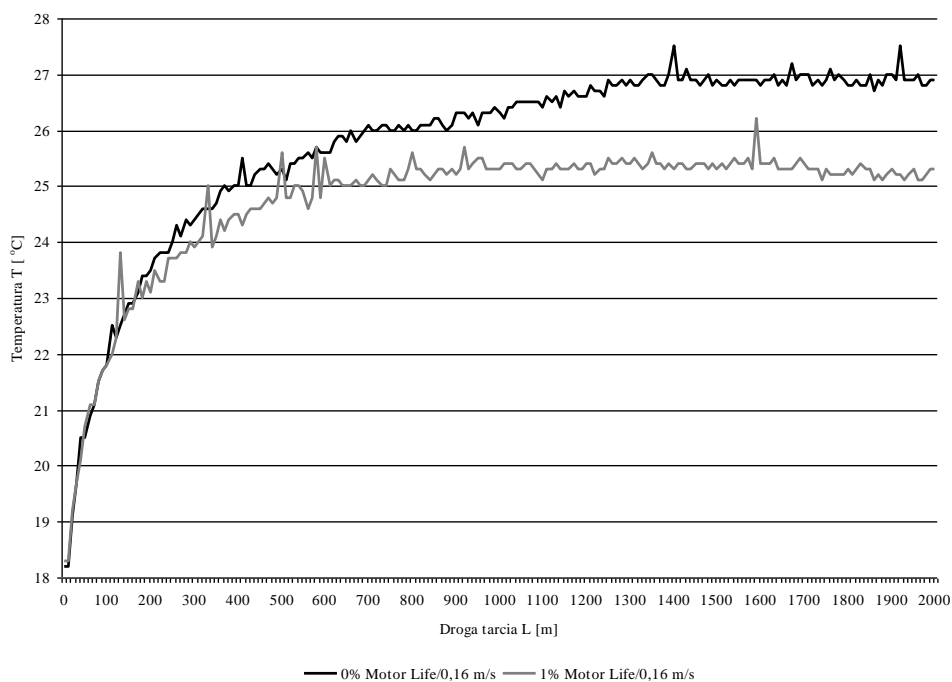


Rys. 4.2. Ubytek masy próbek Δm dla kompozycji 0% i 1% dodatku Motor Life w oleju bazowym SN-150 po drodze tarcia $L = 2000$ m, $v = 0,16$ m/s

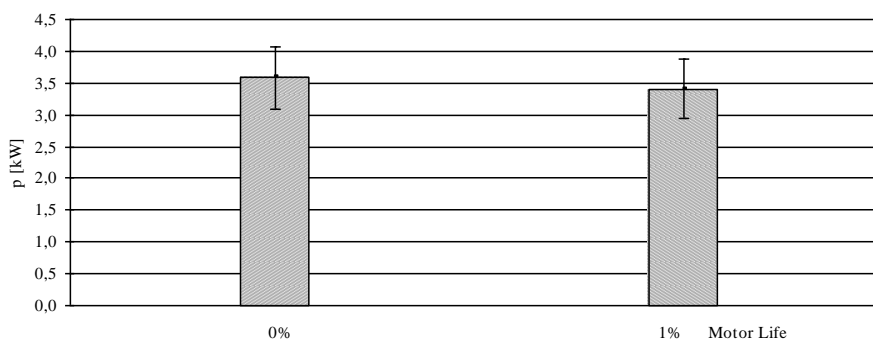


Rys. 4.3. Zmiany SGP po drodze tarcia $L = 2000$ m, opisane zmianą wartości parametru chropowatości R_a przed i po zużyciu dla kompozycji 0% i 1% dodatku Motor Life w oleju bazowym SN-150, $v = 0,16$ m/s

Zwiększenie stężenia badanego PE z 0% na 1% nie spowodowało zmiany ubytku masy badanych próbek. Możliwe, że zmiany tego parametru były, jednak poniżej czułości wagi. Natomiast wyraźnie widać wpływ PE Motor Life na zmniejszenie wartości parametru R_a .



Rys. 4.4. Zmiana temperatury T w komorze olejowej w funkcji drogi tarcia L dla kompozycji 0% i 1% dodatku Motor Life w oleju bazowym SN-150



Rys. 4.5. Średni pobór mocy czynnej P kW dla kompozycji 0% i 1% dodatku Motor Life w oleju bazowym SN-150; droga tarcia $L=2000$ m; $v=0,16$ m/s

Porównując czystą bazę olejową i jej kompozycje z PE Motor Life zaobserwować można, że dla 1% dodatku Motor Life następuje zmniejszenie temperatury T na badanej drodze tarcia o ok. 2°C , następuje szybsza jej

stabilizacja - już po ok. $L = 1000$ m. Stwierdzono również mniejszy o ok. 6% pobór mocy czynnej P dla kompozycji z badanym dodatkiem.

Uzyskane w badaniach wstępnych wyniki potwierdzają istotność obecności dodatku smarowego w aspekcie intensywności procesu zużywania elementów tworzących parę kinematyczną.

Na podstawie badań wstępnych można stwierdzić, że poza potwierdzeniem hipotetycznego założenia, że dodatki smarowe mają wpływ na intensywność procesu zużywania. Wykazano ponadto, że intensywność zużywania zależy także od warunków współpracy elementów. Uznano więc za celowe przeprowadzenie badań głównych przy większym zbiorze wartości czynników badanych. Badania takie umożliwią określenie wzajemnych relacji ilościowych między badanymi wielkościami.

Z wykresu zmian temperatury T wynika, że w początkowym okresie współpracy następuje jej intensywny przyrost – charakterystyczny podczas występowania procesu docierania, a w późniejszym okresie następuje jej stabilizacja. Wyniki badań pozwalają na określenie częstotliwości pomiarów w badaniach zasadniczych oraz odpowiedzieć na pytanie jak długo prowadzić badania, aby zarejestrować istotne zmiany w WW, które rzutują na cały okres eksploatacji obiektu technicznego, w którym rozpatrywane pary kinematyczne występują.

4.1.4. Statystyczne opracowanie liczby powtórzeń pomiarów

Przed przystąpieniem do badań zasadniczych zostały wykonane badania wstępne przeprowadzane dla bazy olejowej SN-150, przy prędkości liniowej $v=0,16$ m/s na drodze tarcia $L=2000$ m. Uzyskane wyniki wykorzystano do wyznaczenia minimalnej liczby pomiarów, niezbędnej do określenia z wystarczającą wiarygodnością wartości mierzonych parametrów podczas badań zasadniczych. Wyznaczono więc zmodyfikowany współczynnik zmienności parametru Rq dla zwiększającej się liczby pomiarów. Przez zmodyfikowany współczynnik zmienności danego parametru rozumie się stosunek odchylenia standardowego s^* wartości średniej do tej wartości \bar{x} , wyrażony w procentach:

$$W = (s^* : \bar{x}) \times 100\%$$

przy czym odchylenie standardowe s^* wyznaczone jest ze wzoru:

$$s^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

w którym:

x_i – wartość poszczególnych wyników pomiarów,

\bar{x} – średnia arytmetyczna wyników pomiarów,

n – liczba pomiarów.

Zmienność współczynnika W w funkcji rzeczywistej liczby próbek dla parametru Rq po zużyciu przedstawiono na rysunkach 4.6 i 4.7 oraz w tabeli 4.1. Mając na względzie fakt, iż odchylenie standardowe wartości średniej maleje wraz ze wzrostem liczby wyników pomiarów, należało oczekiwać, że ze wzrostem liczby pomiarów również zmaleje wartość zmodyfikowanego współczynnika zmienności. Odstępstwo od tej zasady występuje praktycznie, jedynie w przypadku dużej różnicy między wynikami kolejnych pomiarów, wynikającej np. z dużej niejednorodności struktury geometrycznej mierzonej powierzchni. Powyżej jednak pewnej liczby pomiarów, spadek wartości współczynnika jest niewielki i można przyjąć, że dalsze zwiększenie liczby pomiarów nie wpłynie znacząco na rzetelność informacji o badanej powierzchni.

Minimalną liczbę próbek obliczono wg wzoru [124]:

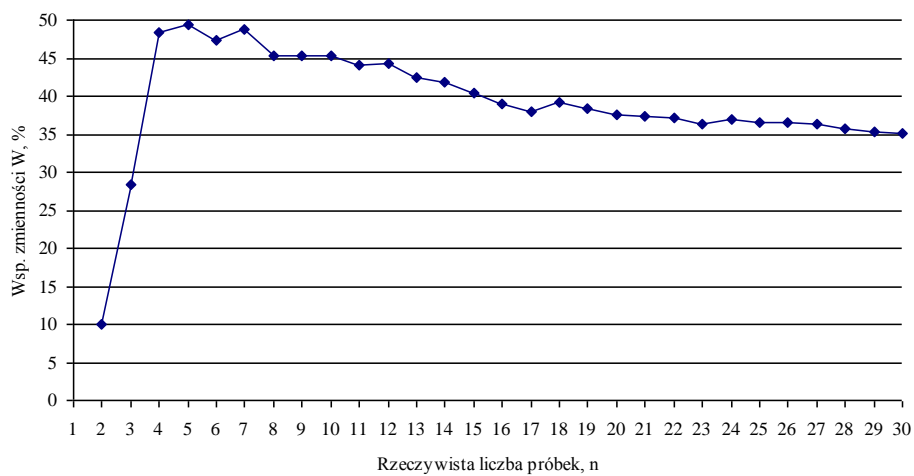
$$n_{\min} \geq \frac{t_{\alpha}^2 \times s^{*2}}{d^2}$$

gdzie: s^* – odchylenie standardowe,

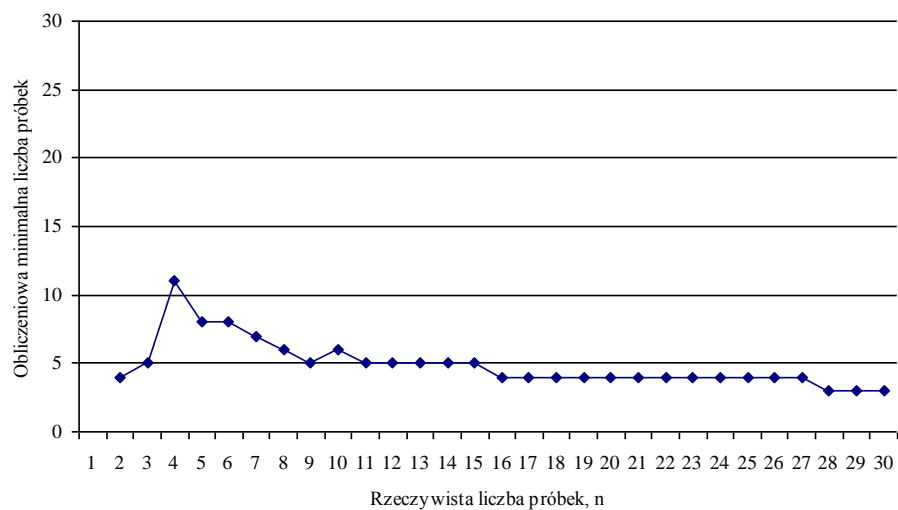
t_{α} – wartość krytyczna rozkładu t-Studenta o $n-1$ stopniach swobody dla przyjętego poziomu ufności $1-\alpha = 0,95$,

d – parametr dokładność, dla którego przyjęto wartość: 0,01.

Jeżeli obliczona minimalna liczebność próby n_{\min} spełnia nierówność $n_{\min} \leq n$, to liczebność n_{\min} próby wstępnej uważamy za wystarczającą przy założonej dokładności d i przyjętym poziomie ufności $1-\alpha$. Taki stan istnieje już dla $n_{\min} = 7$. Jednak z uwagi na to, że w zastosowanym przyrządzie tribologicznym jednorazowo znajdują się 3 próbki, więc minimalna liczba próbek powinna być podzielna bez reszty przez 3. Najbliższą większą taką liczbą spełniająca wyżej wymieniony warunek jest liczba 9. Liczbę tę przyjęto za minimalną konieczną liczbę próbek.



Rys. 4.6. Zależność współczynnika zmienności W od rzeczywistej liczby próbek dla parametru Rq po zużyciu; obliczenia przy poziomie ufności $1-\alpha = 0,95$



Rys. 4.7. Zależność minimalnej obliczeniowej liczby próbek od rzeczywistej liczby próbek dla parametru Rq po zużyciu przy poziomie ufności $1-\alpha = 0,95$

Tabela 4.1. Wyniki obliczeń zmodyfikowanego współczynnika zmienności parametru Rq mierzonego po zużyciu oraz minimalnej liczby próbek

Liczba przeprowadzonych prób, n	Rq, μm	Średnia \bar{x} , μm	Odchylenie standardowe s^*	Wsp. zmienności W, %	Odchyłka przy poziomie ufności 95%, μm	Min. liczba próbek, n_{min}
1	0,13	0,1300	-----	-----	-----	-----
2	0,15	0,1400	0,0141	10,1015	0,020	4
3	0,22	0,1667	0,0473	28,3549	0,053	5
4	0,36	0,2150	0,1041	48,4108	0,102	11
5	0,13	0,1980	0,0978	49,4073	0,086	8
6	0,34	0,2217	0,1050	47,3505	0,084	8
7	0,13	0,2086	0,1019	48,8499	0,075	7
8	0,30	0,2200	0,0997	45,3245	0,069	6
9	0,15	0,2122	0,0961	45,3054	0,063	5
10	0,37	0,2280	0,1035	45,3829	0,064	6
11	0,19	0,2245	0,0988	44,0131	0,058	5
12	0,15	0,2183	0,0967	44,2700	0,055	5
13	0,21	0,2177	0,0926	42,5234	0,050	5
14	0,34	0,2264	0,0948	41,8478	0,050	5
15	0,31	0,2320	0,0938	40,4412	0,047	5
16	0,29	0,2356	0,0918	38,9579	0,045	4
17	0,22	0,2347	0,0890	37,9030	0,042	4
18	0,13	0,2289	0,0898	39,2171	0,041	4
19	0,32	0,2337	0,0897	38,3868	0,041	4
20	0,32	0,2380	0,0894	37,5711	0,039	4
21	0,18	0,2352	0,0881	37,4383	0,038	4
22	0,19	0,2332	0,0865	37,0896	0,036	4
23	0,31	0,2365	0,0860	36,3614	0,035	4
24	0,15	0,2329	0,0859	36,9000	0,034	4
25	0,34	0,2372	0,0868	36,6019	0,034	4
26	0,18	0,2350	0,0858	36,5115	0,033	4
27	0,19	0,2333	0,0846	36,2487	0,032	4
28	0,21	0,2325	0,0831	35,7490	0,031	3
29	0,32	0,2355	0,0832	35,3351	0,030	3
30	0,34	0,2390	0,0840	35,1332	0,030	3

W analogiczny sposób zostały przeprowadzone obliczenia współczynnika zmienności W oraz minimalnej obliczeniowej liczby próbek dla pozostałych parametrów: R_t , R_{pk} i R_a . W każdym z tych przypadków liczba 9 spełnia w/w warunki i tę liczbę przyjęto jako niezbędną licznosc próby w realizowanym eksperymencie.

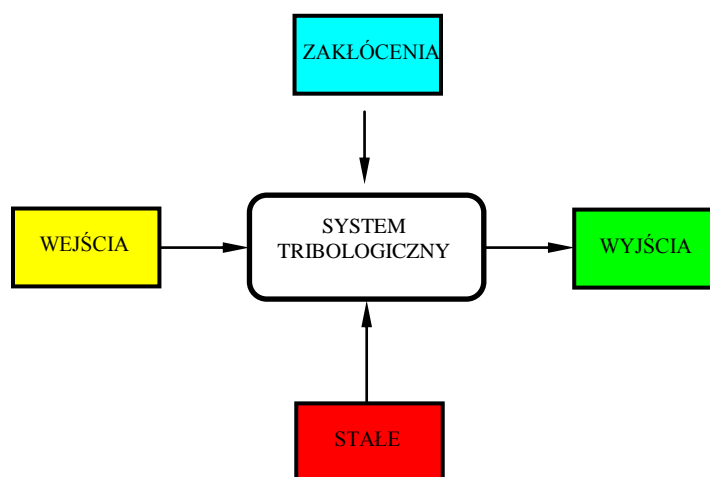
4.2. Warunki zasadniczych badań doświadczalnych

4.2.1. Przedmiot i obiekt badań

Przedmiotem badań w niniejszej pracy jest proces zużywania próbek ze stykiem konforemnym zachodzący w obecności preparatu eksploatacyjnego o zdefiniowanym składzie. W celu poznania jego przebiegu przeprowadzono badania na stanowisku tribologicznym. Obiektem badań były próbki, które miały kształt sześciianu, przeciwpróbka wykonana była w postaci płaskiej płytki pierścieniowej.

4.2.2. Zakres i model badań

Istotą badań tribologicznych jest obserwacja zjawisk oraz mechanizmów towarzyszących procesowi tarcia. Dokonane spostrzeżenia weryfikują posiadaną już wiedzę i ewentualnie ją poszerzają, umożliwiają także formułowanie wniosków. Pozwalają one osiągnąć podstawowy cel badań tribologicznych jakim jest uzyskanie możliwości sterowania procesami tribologicznymi. Ogólny schemat systemu tribologicznego – węzła tarcia, w którym zachodzą procesy tribologiczne, przedstawiony jest na rysunku 4.8.



Rys. 4.8. Ogólny model systemu tribologicznego [107]

Koniecznym elementem badań tribologicznych jest określenie wielkości kontrolowanych i niekontrolowanych zarówno wejściowych jak i wyjściowych.

Do wejść kontrolowanych zalicza się czynniki zadawane jak i czynniki stałe (niezmienne) w czasie badań. Wejścia niekontrolowane to różnego rodzaju zakłócenia wpływające losowo na system tribologiczny.

Odpowiedzią systemu na wymuszenia są zmiany czynników wyjściowych, które mogą być zarówno kontrolowane jak i niekontrolowane. Wyjścia kontrolowane to odpowiedź systemu tribologicznego na wielkości wejściowe: zadawane i stałe. Wyjścia niekontrolowane to zmiany stochastyczne spowodowane czynnikami, których wpływu na badane wielkości nie określa się.

Po to, aby osiągnąć założony cel niniejszej pracy, na podstawie analizy źródeł literaturowych [107] oraz wstępnych badań doświadczalnych, opracowano model badań, który został przedstawiony na rysunku 4.9.

Przedstawione w pracy badania zrealizowano według planu: statycznego (S), zdeterminowanego (D), kompletnego (K), różnowartościowego, w literaturze jest on oznaczony symbolem PS/DK – v [88,89]. Wybrano taki wariant planu badań, gdyż na podstawie posiadanej wiedzy z zakresu par kinematycznych ze stykiem konforemnym zbiór badanych czynników można było określić przed badaniami, bez obawy o pominięcie jakiegoś ważnego elementu – stąd plan statyczny. Posiadana wiedza pozwalała także na przyjęcie planu zdeterminowanego – wykluczającego wpływ czynników losowych. Kompletny plan badań jest podstawowym planem badań i jego przyjęcie podyktowane było chęcią uzyskania możliwie obszernego zbioru wyników, które umożliwiałyby właściwe wnioskowanie i dokonanie uogólnień. Plan różnowartościowy – umożliwia zastosowanie różnych liczb wartości poszczególnych wielkości badanych, co było korzystne ze względu na zróżnicowany ich charakter.

Czynniki wejściowe

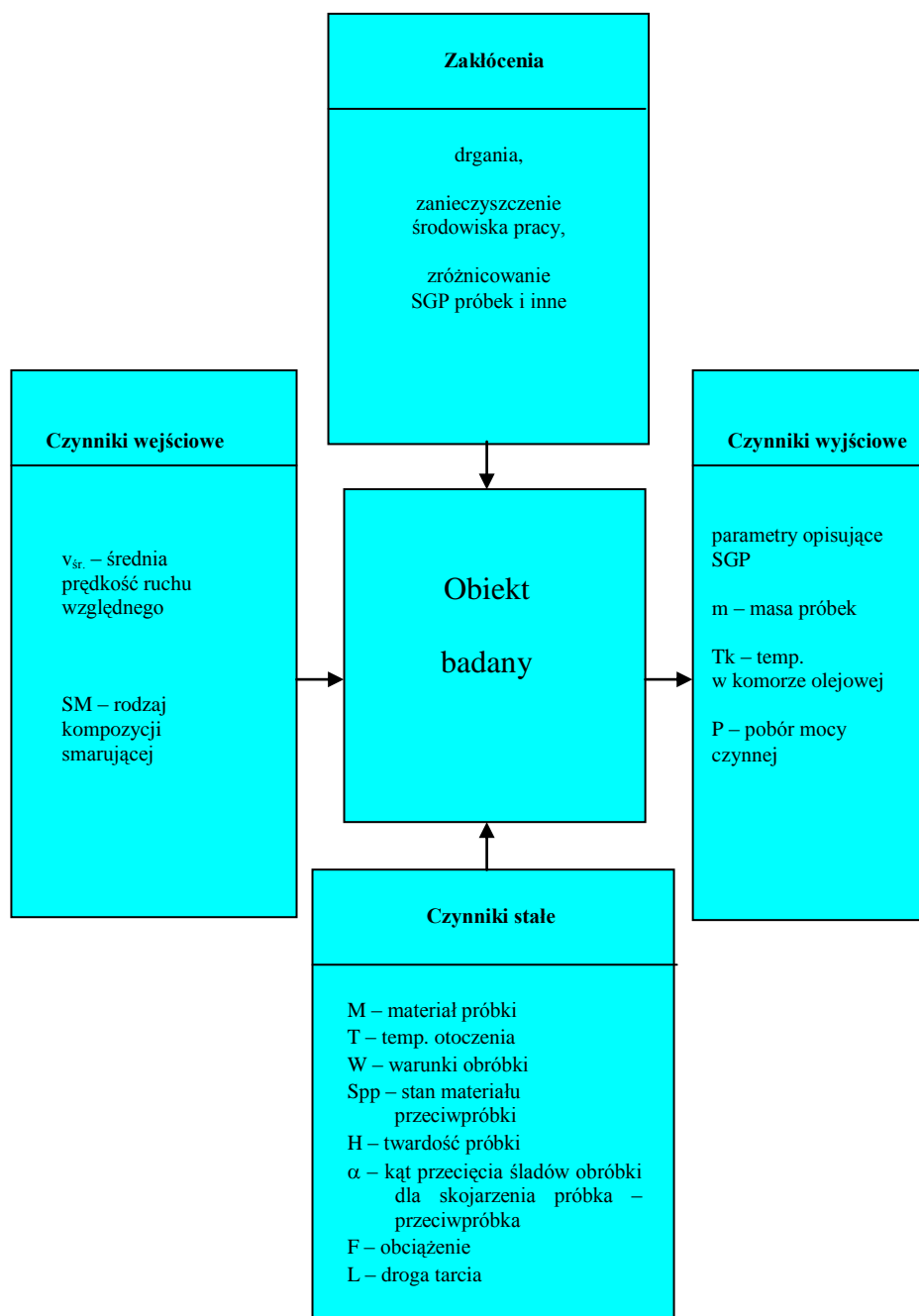
Na podstawie zebranych informacji literaturowych dokonano wyboru poniższych wielkości, które stanowią zbiór czynników wejściowych:

- średnia prędkość ruchu względnego, $v_{sr.}$,
- rodzaj kompozycji smarującej, SM .

Wartości wielkości wejściowych przyjęto na podstawie badań wstępnych popartych analizą informacji literaturowych.

Średnia prędkość ruchu względnego podczas badań wynosiła: 4,8 m/min (0,08 m/s) i 9,6 m/min (0,16 m/s).

Próbki z przeciwpróbką współpracowały przy obciążeniu zewnętrznym wynoszącym 600 N, co przy powierzchni styku próbek z przeciwpróbką wynoszącej 300 mm², odpowiada teoretycznym naciskom w strefie styku 2,0 MPa.



Rys. 4.9. Model prezentowanych w niniejszej pracy badań

Uwzględniając materiał próbek i przeciwpróbki, przyjęto następującą twardość próbek: 40 HRC, przeciwpróbki: 60 HRC.

Na podstawie literatury i badań wstępnych przyjęto wartość drogi tarcia wynoszącą 600 m. Dla tej drogi tarcia w przypadku czystej bazy olejowej SN-150 następuje stabilizacja badanych czynników zarówno przy prędkości ruchu względnego 0,08 jak i 0,16 m/s.

Jako dodatki do bazy olejowej SN-150 wybrano PE Motor Life oraz Mind M. Przy ich wyborze kierowano się następującymi kryteriami: dostępności, mechanizmu działania, przeznaczenia. Poza tym w analizowanej literaturze nie stwierdzono przypadku badań nad kompozycją smarową składającą się z w/w preparatów eksploatacyjnych.

Pierwszy z preparatów jest szeroko rozpowszechniony w Polsce. Powoduje modyfikację warstwy wierzchniej poprzez wytworzenie warstwy granicznej w wyniku sorpcji fizycznej i chemicznej. Zawiera syntetyczne komponenty bazowe, dodatki przeciwdziałające zużyciu, antyutleniacze, związki przeznaczone do pracy w ekstremalnych ciśnieniach. Preparat Mind M natomiast stanowi kompleks węglowodorowy, łączący się chemicznie z metalem podłoża tworząc mikroskopijną jednocząsteczkową niewyflukiwalną warstwę. Rozkłada siły nacisku na większą powierzchnię, tym samym zwiększając trwałość materiałów konstrukcyjnych. Wchodzi w reakcje z podłożem metalicznym (żelaznym lub nieżelaznym) głównie w miejscach o podwyższonej temperaturze procesu tarcia [41, 42, 51, 52].

Producenci w/w preparatów zalecają ich 5% stężenia w bazie olejowej. W niniejszej pracy przyjęto stężenia zarówno mniejsze od tej wartości jak i większe w celu lepszego poznania ich działania. Przyjęto więc następujące stężenia: 0% (czysta baza olejowa); 0,5%; 1%; 2%; 5% i 7% badanego dodatku w bazie olejowej. Trzecim PE była kompozycja składająca się z Motor Life'u i Mind'u M w stosunku 1:1 o w/w stężeniach.

W przedstawionym powyżej programie badań jako czynniki wejściowe przyjęto więc dwie badane wielkości ($k = 2$), które miały odpowiednio 2 i 16 wartości (n_i).

Zrealizowanie badań według przedstawionego programu wymagało dokonania 288 doświadczeń. Ze względu na to, że w czasie jednego cyklu, badano jednocześnie trzy próbki, liczba niezbędnych doświadczeń zmniejszyła się do 96.

Czynniki wyjściowe

Na podstawie informacji literaturowych do zbioru czynników wyjściowych, przyjęto wielkości charakteryzujące proces zużywania:

- ubytek masowy Δm ,
- zmianę temperatury w komorze olejowej T ,
- pobór elektrycznej mocy czynnej p ,
- wielkości opisujące zmiany struktury geometrycznej powierzchni – parametry chropowatości.

Ubytek masowy jest bezwzględną miarą zużycia, powszechnie stosowany w praktyce badawczej i przemysłowej. Jest wielkością reprezentatywnie opisującą proces zużycia.

Na podstawie pomiaru temperatury w komorze olejowej możliwe jest określenie jej wartości. Ciepło generowane podczas tarcia stanowi największą część energii dostarczonej do układu.

Tarcie charakteryzuje się stratami energii mechanicznej. Pomiar poboru elektrycznej mocy czynnej pozwala określić wielkość mocy dostarczonej do układu.

Autorzy pracy [77] dokonując analizy ok. 300 publikacji ustalili częstość wykorzystywania parametrów SGP, określających właściwości eksploatacyjne powierzchni, a jej wyniki przedstawiono w tabeli 4.2. Na tej m.in. podstawie do zbioru parametrów chropowatości wybrano następujące parametry chropowatości: parametry amplitudowe Rq , Ra i Rt oraz parametr charakteryzujący krzywą nośności Rpk .

Tabela 4.2. Częstość wykorzystania parametrów SGP w celu określenia właściwości eksploatacyjnych powierzchni (%) [77]

Parametr SGP	Ra	Rz	Rt	Rq	Std	Rds	Rdq
Częstotliwość wykorzystania	98	92	67	12	8	6	6

Wymienione parametry wybrano ze względu na ich przydatność w analizie struktury geometrycznej powierzchni. Parametr Rq , który jest średnią kwadratową rzędnych profilu, jest funkcjonalnie powiązany z parametrem Ra (średnia arytmetyczna rzędnych profilu). Parametr Ra z kolei jest powszechnie stosowany w praktyce przemysłowej, jednak z naukowego punktu widzenia lepszym parametrem jest Rq . Jest to bowiem odchylenie średniokwadratowe, czyli odpowiednik odchylenia standardowego σ powszechnie stosowanego w statystyce.

Parametry Rt – całkowita wysokość profilu, oraz Rpk – zredukowana wysokość wzniesień profilu dobrze charakteryzują zmiany na powierzchni w początkowym okresie współpracy. Inaczej mówiąc Rpk jest średnią wysokością górnej części profilu powierzchni tj. wzniesień profilu wystających ponad jego rdzeń. Charakteryzuje on zachowanie SGP podczas docierania powierzchni ślizgowych i tocznych.

Pomiary parametrów opisujących SGP mierzono w układzie płaskim (2D). Dokonywano ich za pomocą profilografometru Hommel Tester T 2000 firmy Hommel Werke.

Czynniki stałe i zakłócenia

Do czynników stałych podczas badań zaliczono tworzywo konstrukcyjne próbek jakim była stal 102Cr6 (NC6). Stal ta charakteryzuje się m.in. małym rozrzutem twardości po obróbce cieplnej, dlatego aby twardość próbek mieściła się w wąskim zakresie wybrano do badań ten materiał.

Przyjęto, że materiał przeciwpróbki jak i jej twardość (H) podczas badań nie ulegały zmianie. Te cechy próbek zostały więc także zaliczone do czynników stałych. Przeciw próbka wykonana była ze stali X210Cr12 (dawniej NC11) zahartowanej do twardości 60 ± 2 HRC. Twardość przeciw próbki zdecydowanie przewyższała twardość próbek, po to aby ukierunkować proces zużywania i skutku transformacji warstwy wierzchniej widoczne były przede wszystkim na próbkach. Stan SGP przeciw próbki był okresowo kontrolowany – jej struktura nie wykazywała istotnych oznak zużycia.

Jako czynniki stałe przyjęto również warunki obróbki elementów badanych – powierzchnie szlifowane, temperaturę pracy (temperaturę, w której zachodziła transformacja WW) równą temperaturze otoczenia – 293 K.

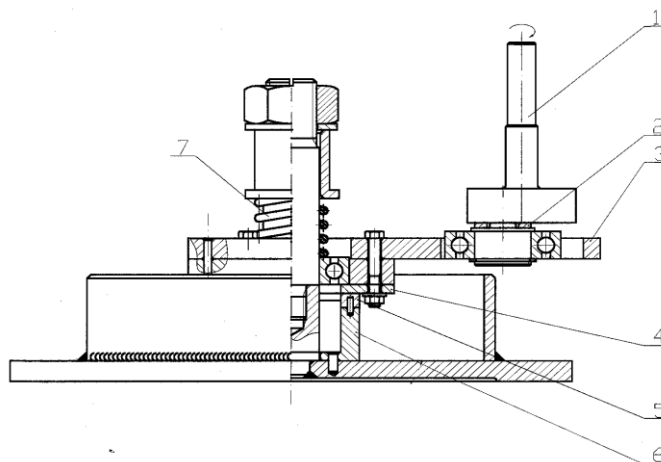
Do losowych, niekontrolowanych czynników wejściowych – zakłóceń, zaliczono m.in:

- drgania wynikające z odchyłek wykonawczych elementów stanowiska,
- zanieczyszczenie środowiska pracy,
- zróżnicowanie SGP próbek spowodowane np. procesem zużywania narzędzia podczas obróbki,
- zmienność siły docisku wynikającą z montażowej odchyłki ugięcia sprężyny, a także z postępującego zużycia próbek,
- rozrzut twardości próbek, spowodowany przez np. niejednorodność materiału próbek w całej jego objętości.

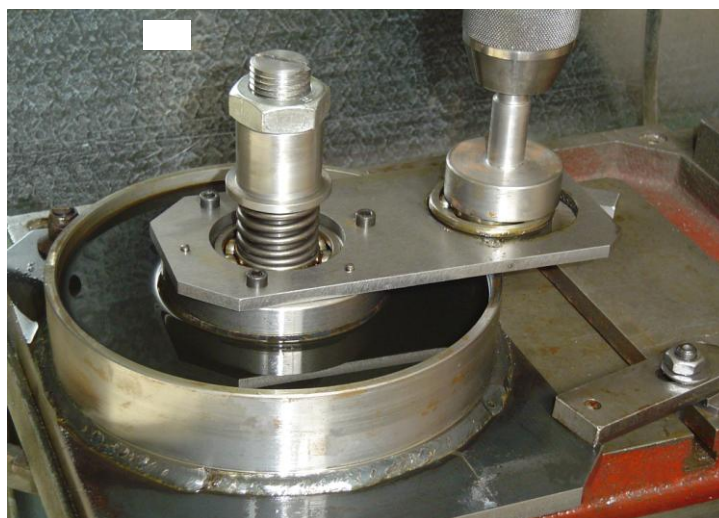
4.3. Stanowisko badawcze

W celu zrealizowania badań o określonym zakresie zmodernizowano istniejące stanowisko badawcze przedstawione na rysunku 4.10.

a)



b)



Rys. 4.10. Część mechaniczna stanowiska badawczego: a) postać konstrukcyjna (opis w tekście), b) widok zasadniczej części stanowiska

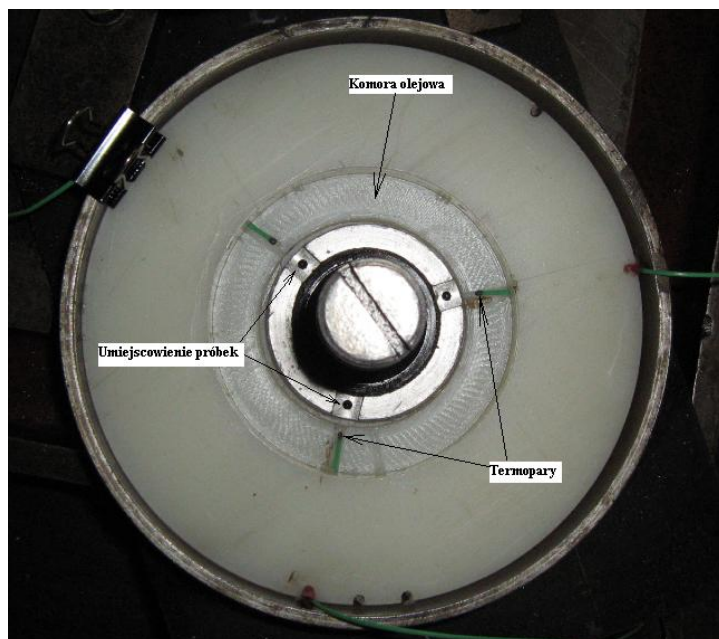
Badane próbki (5) mocuje się w trzech rowkach wykonanych co 120° na czole tuleji ustalającej próbki (6). Uzyskuje się w ten sposób pewny i równomierny trójpowierzchniowy docisk współpracujących elementów realizowany za pomocą sprężyny (7). Próbki umieszczone są w tulei

nieruchomo, a względny, oscylacyjny ruch wykonuje przeciwpróbka (4). Ruch oscylacyjny przekazywany na łożyskowaną przeciwpróbkę, uzyskujemy przez zmianę ruchu obrotowego na ruch liniowy za pomocą dźwigni (3) i mimośrod (2). Zmianę długości przemieszczeń względnych próbki i przeciwpróbki (elementarna droga tarcia) uzyskuje się za pomocą mimośrod o różnych wartościach przesunięcia jego osi. Aby zminimalizować zużycie elementów stanowiska mimośród oddziałuje na dźwignię poprzez łożysko toczne.

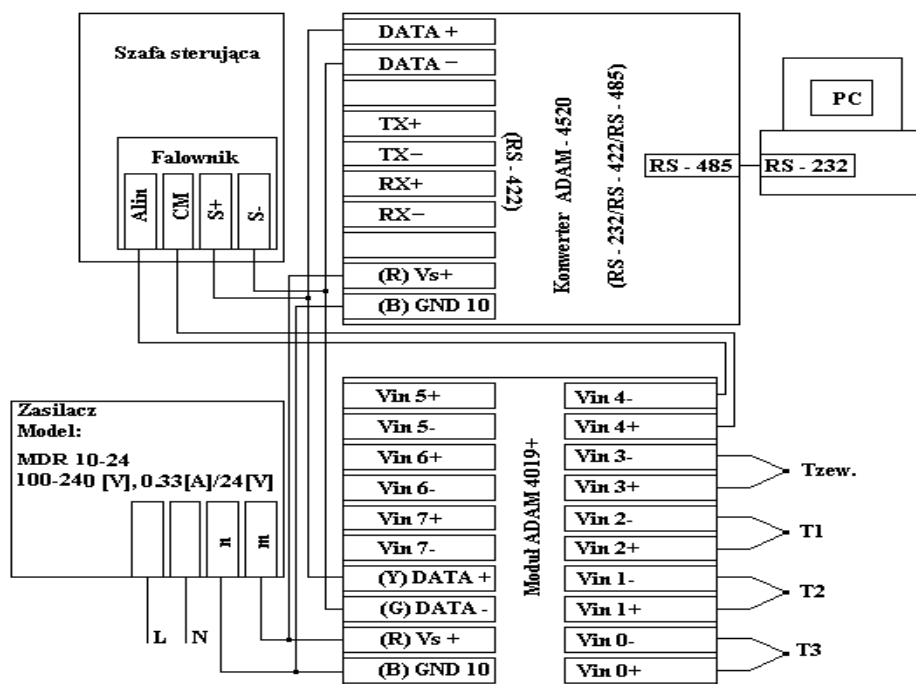
Kolejne wartości obciążenia uzyskuje się w rezultacie zmiany napięcia sprężyny (7). Zastosowanie sprężyn o różnej charakterystyce zwiększa zakres zmienności siły docisku. Dzięki stosowaniu sprężyny wartość docisku jest stała w czasie.

W ramach modernizacji, w części elektrycznej stanowisko badawcze wyposażono w szafę sterującą zawierającą jako główne składowe: falownik oraz moduł ADAM 4019+ (wraz z termoparami typu K) i konwerter ADAM 4520 firmy Advantech. Do komunikacji między w/w elementami strukturalnymi a komputerem zastosowano oprogramowanie ADAMView. Taki układ umożliwił bieżący pomiar temperatury oleju i mocy pobieranej przez stanowisko. Termopary umieszczono w odległości 5 mm od powierzchni próbek (rys. 4.11). Schemat blokowy połączeń między poszczególnymi elementami przedstawiono na rys. 4.12.

We wnętrzu stalowego pierścienia umieszczono wkładkę umożliwiającą zmniejszenie objętości PE stosowanego w eksperymencie.



Rys. 4.11. Rozmieszczenie termopar w komorze olejowej



Rys. 4.12. Schemat blokowy połączeń stanowiska do badań tribologicznych
Tzew., T1, T2, T3 – termopary typu K, PC-komputer z portem komunikacyjnym RS-232

Zmodernizowane w ten sposób stanowisko stwarza nowe możliwości pomiarowe w wyniku czego monitorowanie procesu zużywania jest pełniejsze. Opisana konfiguracja stanowiska umożliwiła ponadto rejestrację uzyskanych wyników dzięki czemu ich opracowanie jest ułatwione i szybsze. Interpretacja wyników także jest łatwiejsza.

5. WYNIKI BADAŃ PODSTAWOWYCH I ICH INTERPRETACJA

Zgodnie z wcześniej przedstawionym modelem badań dokonano wyboru wielkości, które stanowią zbiór czynników wejściowych – są to: średnia prędkość ruchu względnego v_{sr} oraz rodzaj kompozycji smarującej *SM*. Odpowiedzią układu są parametry opisujące SGP, zmiana masy próbek, temperatura w komorze olejowej oraz pobór mocy. Czynnikiem stałymi są:

- materiał próbek,
- temperatura otoczenia,
- warunki obróbki,
- stan materiału przeciwpróbki,
- stan materiału próbki,
- obciążenie,
- droga tarcia.

Do zakłóceń wpływających na obiekt badań należy zaliczyć m.in. drgania, zanieczyszczenie powietrza itp., a także te, opisane przy badaniach wstępnych.

Do oceny intensywności procesu zużywania wybrano zmianę masy próbek Δm (ubytek masy w porównaniu do masy początkowej próbek), zmiany temperatury w komorze olejowej, zmiany mocy elektrycznej oraz zmianę wybranych parametrów chropowatości.

5.1. Zmiana geometrycznych cech konstrukcyjnych próbek jako miara intensywności procesu zużywania

Analizę intensywności procesu zużywania warstwy wierzchniej za pomocą parametrów chropowatości przeprowadzono dla różnych stężeń objętościowych PE: Mind M i Motor Life w bazie olejowej SN-150 (0%; 0,5%; 1%; 2%; 5%; 7%). Trzecim PE była Kompozycja utworzona z dodatków Mind M i Motor Life w stosunku 1:1 o następujących składach:

- 99,5% oleju bazowego SN-150, 0,25% Motor Life, 0,25% Mind M,
- 99% oleju bazowego SN-150, 0,5% Motor Life, 0,5% Mind M,
- 98% oleju bazowego SN-150, 1% Motor Life, 1% Mind M,
- 95% oleju bazowego SN-150, 2,5% Motor Life, 2,5% Mind M,
- 93% oleju bazowego SN-150, 3,5% Motor Life, 3,5% Mind M.

Do oceny intensywności zużywania warstwy wierzchniej w skali mikro, wybrano następujące parametry chropowatości: Rq , Ra , Rt , oraz parametr charakteryzujący krzywą nośności Rpk . Uzasadnienie wyboru takiego właśnie zbioru parametrów, podano w podrozdziale 4.2.2.

Pozostałe wartości wielkości wejściowych przyjęto:

$$v_1 = 0,08 \text{ m/s}, v_2 = 0,16 \text{ m/s}.$$

Wartości czynników stałych były następujące:

$$F = 600 \text{ N}, S = 40 \text{ HRC}, L = 2000 \text{ m}.$$

Z przedstawionych poniżej wykresów wynika, że dla danego stężenia badanego PE część parametrów chropowatości ulega istotnej zmianie, natomiast inne nie wykazują praktycznie żadnych zmian.

Szczegółowa analiza wyników uzyskanych w tej części badań została przedstawiona na kolejnych wykresach – rys. 5.1÷5.8.

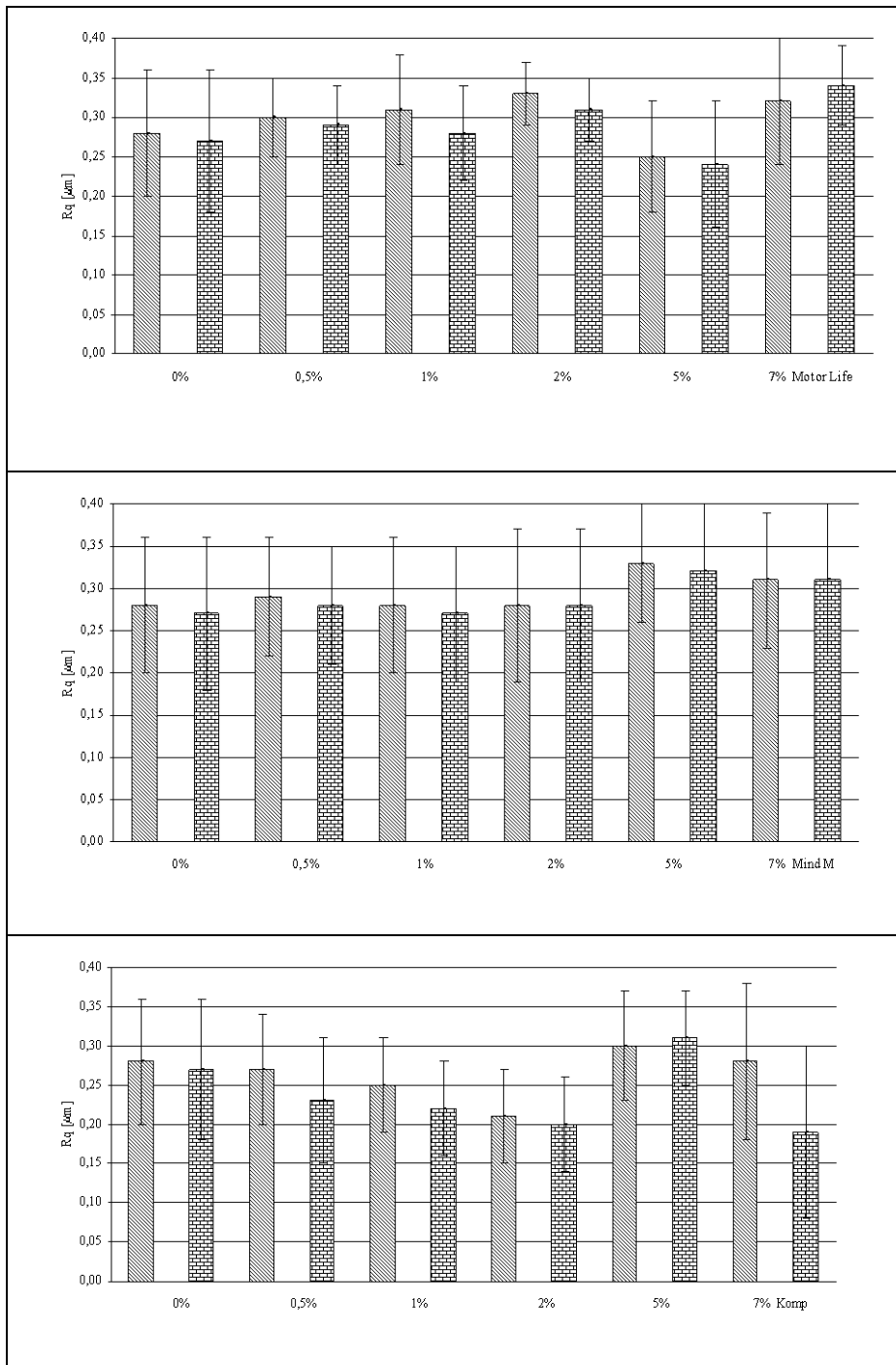
Parametr Rq będący średnią kwadratową rzędnych profilu chropowatości jest równocześnie odpowiednikiem odchylenia standardowego wartości rzędnych wewnątrz odcinka pomiarowego. Parametr ten ma w większym stopniu charakter statystyczny niż Ra oraz jego wartość jest bardziej zależna od pojedynczych wzniesień i wgłębień niż Ra . Stwierdzono (rys. 5.1), że w wyniku procesu eksploatacji wartość badanego parametru Rq zmieniła się następująco:

- dla stężeń PE Motor Life w oleju bazowym SN-150 równych: 0%; 0,5%; 1%; 2% i 5% zmniejszył swoją wartość po zużyciu,
- dla stężeń PE Mind M w oleju bazowym SN-150 równych: 0%; 0,5%; 1% i 5% zmniejszył swoją wartość po zużyciu,
- dla stężeń PE Komp w oleju bazowym SN-150 równych: 0%; 0,5%; 1%; 2%; 7% zmniejszył swoją wartość po zużyciu.

W/w wyniki świadczą o trendzie do zmniejszania się wartości parametru Rq po zużyciu, co można przyjąć jako zjawisko naturalne, poprawne. Dla stężeń PE Mind M w oleju bazowym SN-150 równych 2% i 7% parametr Rq nie zmienił swojej wartości po zużyciu. Stwierdzono również, że dla:

- stężenia PE Motor Life równego: 7%,
- stężenia PE Komp równego: 5%,

nastąpiło zwiększenie wartości parametru Rq po zużyciu. Tłumaczyć to można tym, że względnie duże stężenia badanych dodatków powodują zwiększenie lepkości, a to może być przyczyną, że produkty zużycia są trudniej odprowadzane z przestrzeni roboczej.



▨ dla $L=0\text{ m}$

▣ dla $L=2000\text{ m}$

Rys. 5.1. Zmiana wartości parametru chropowatości R_q dla różnych stężeń PE przy prędkości v_1

Zmiany wartości Ra – średniej arytmetycznej profilu przedstawiono na rys. 5.2. Parametr Ra ma charakter uśredniający i dlatego nie stanowi informacji o kształcie profilu. Jest on niezależny od tego, czy profil ma wierzchołki czy wgłębienia. Stwierdzono, że w wyniku procesu eksploatacji wartość badanego parametru Ra zmieniła się następująco:

- dla stężeń PE Motor Life w oleju bazowym SN-150 równych: 1%; 2% i 5% Ra zmniejszył swoją wartość po zużyciu,
- dla stężeń PE Mind M w oleju bazowym SN-150 równych: 1%; 2% i 5% Ra zmniejszył swoją wartość po zużyciu,
- dla stężeń PE Komp w oleju bazowym SN-150 równych: 0,5%; 1%; 7% parametr Ra zmniejszył swoją wartość po zużyciu.

W/w wyniki świadczą o trendzie do zmniejszania się wartości parametru Ra po zużyciu, co można przyjąć jako zjawisko naturalne. Stwierdzono również, że dla:

- stężenia PE Motor Life równego: 7%,
- stężenia PE Komp równego: 5%,

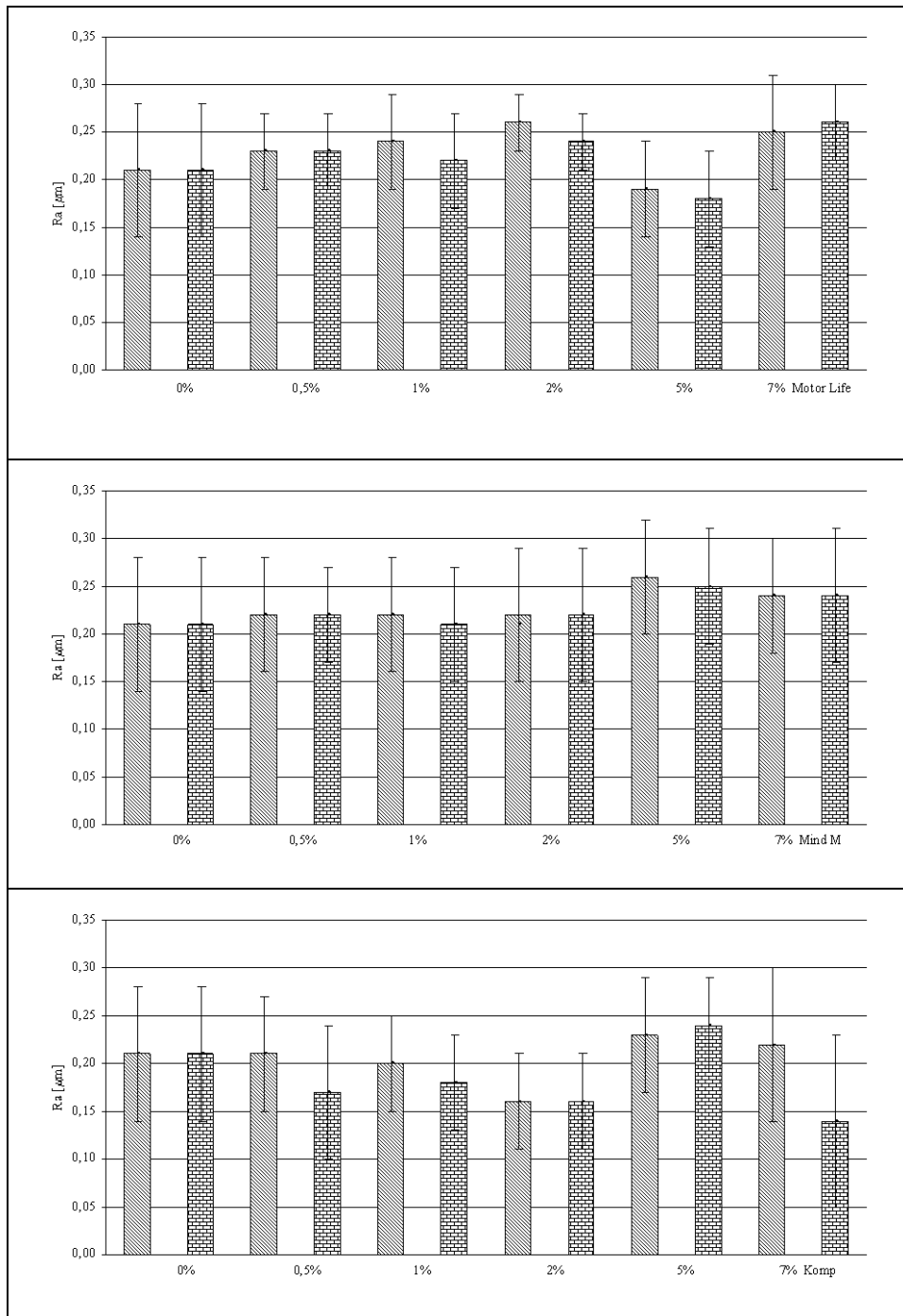
nastąpił wzrost wartości parametru Ra po zużyciu. Również w tym przypadku tłumaczyć można to tym, że dla dużych stężeń badanych dodatków mogą występować trudności w odprowadzaniu produktów zużycia z przestrzeni roboczej współpracujących elementów. Dla pozostałych badanych stężeń i rodzajów PE parametr Ra nie zmienił swojej wartości po zużyciu.

Zgodnie z literaturą [63] wartość parametru Rq dla profili losowych o normalnym rozkładzie rzędnych wynosi $1,25Ra$. Średnie zmiany relacji między tymi parametrami uzyskane w niniejszych badaniach zamieszczono w tabeli 5.1, natomiast jak się te zmiany kształtowały dla poszczególnych stężeń dodatków pokazano w tabeli 5.2. Krotność parametru Rq względem Ra przed zużyciem, czyli bezpośrednio po obróbce mechanicznej i po zużyciu na badanej drodze tarcia praktycznie jest stała. Tym samym można uznać, że badane PE nie wpływają na zmianę rodzaju rozkładu rzędnych mierzonego profilu badanych próbek.


Kolejny analizowany parametr – Rt , jest sumą wysokości najwyższego wzniesienia i głębokości największego wgłębienia odcinka pomiarowego. Stwierdzono (rys. 5.3), że w wyniku procesu eksploatacji jego wartość zmieniła się następująco:

- dla stężeń PE Motor Life w oleju bazowym SN-150 równych: 0%; 1% i 2% zmniejszył swoją wartość po zużyciu,
- dla stężeń PE Mind M w oleju bazowym SN-150 równych: 0,5%; 1% i 2% zmniejszył swoją wartość po zużyciu,
- dla stężeń PE Komp w oleju bazowym SN-150 równych: 0,5%; 1%; 2%; 5% zmniejszył swoją wartość po zużyciu.

W/w wyniki świadczą o naturalnym procesie zużycia. Podczas eksploatacji wierzchołki nierówności uległy ścięciu, dlatego parametr ten zmniejszył swoją wartość.



 dla $L=0\text{ m}$

 dla $L=2000\text{ m}$

Rys. 5.2. Zmiana wartości parametru chropowatości R_a dla różnych stężeń PE przy prędkości v_1

Tabela 5.1. Średnie wartości krotności parametru Rq dla badanych preparatów przy prędkości v_1

Badany PE	Krotność Rq przed zużyciem	Krotność Rq po zużyciu
PE Motor Life + SN-150	1,29 Ra	1,29 Ra
PE Mind M+ SN-150	1,28 Ra	1,28 Ra
PE Komp+ SN-150	1,28 Ra	1,29 Ra

Tabela 5.2. Wartości zmierzonych parametrów Rq i Ra dla różnych stężeń PE przy prędkości v_1

Środek smarowy	Stężenia, %	Rq przed zużyciem, μm	Ra przed zużyciem, μm	Krotność Rq przed zużyciem	Rq po zużyciu, μm	Ra po zużyciu, μm	Krotność Rq po zużyciu
SN-150	0%	0,28	0,21	1,33	0,27	0,21	1,29
PE Motor Life + SN-150	0,5%	0,30	0,23	1,30	0,29	0,23	1,26
	1%	0,31	0,24	1,29	0,28	0,22	1,27
	2%	0,33	0,26	1,26	0,31	0,24	1,29
	5%	0,25	0,19	1,31	0,24	0,18	1,33
	7%	0,32	0,25	1,28	0,34	0,26	1,30
PE Mind M + SN-150	0,5%	0,29	0,22	1,31	0,28	0,22	1,27
	1%	0,28	0,22	1,27	0,27	0,21	1,29
	2%	0,28	0,22	1,27	0,28	0,22	1,27
	5%	0,33	0,26	1,27	0,32	0,25	1,28
	7%	0,31	0,24	1,29	0,31	0,24	1,29
PE Komp + SN-150	0,5%	0,27	0,21	1,29	0,23	0,17	1,35
	1%	0,25	0,2	1,25	0,22	0,18	1,22
	2%	0,21	0,16	1,31	0,20	0,16	1,25
	5%	0,30	0,23	1,30	0,31	0,24	1,29
	7%	0,28	0,22	1,27	0,19	0,14	1,36

Stwierdzono również, że dla:

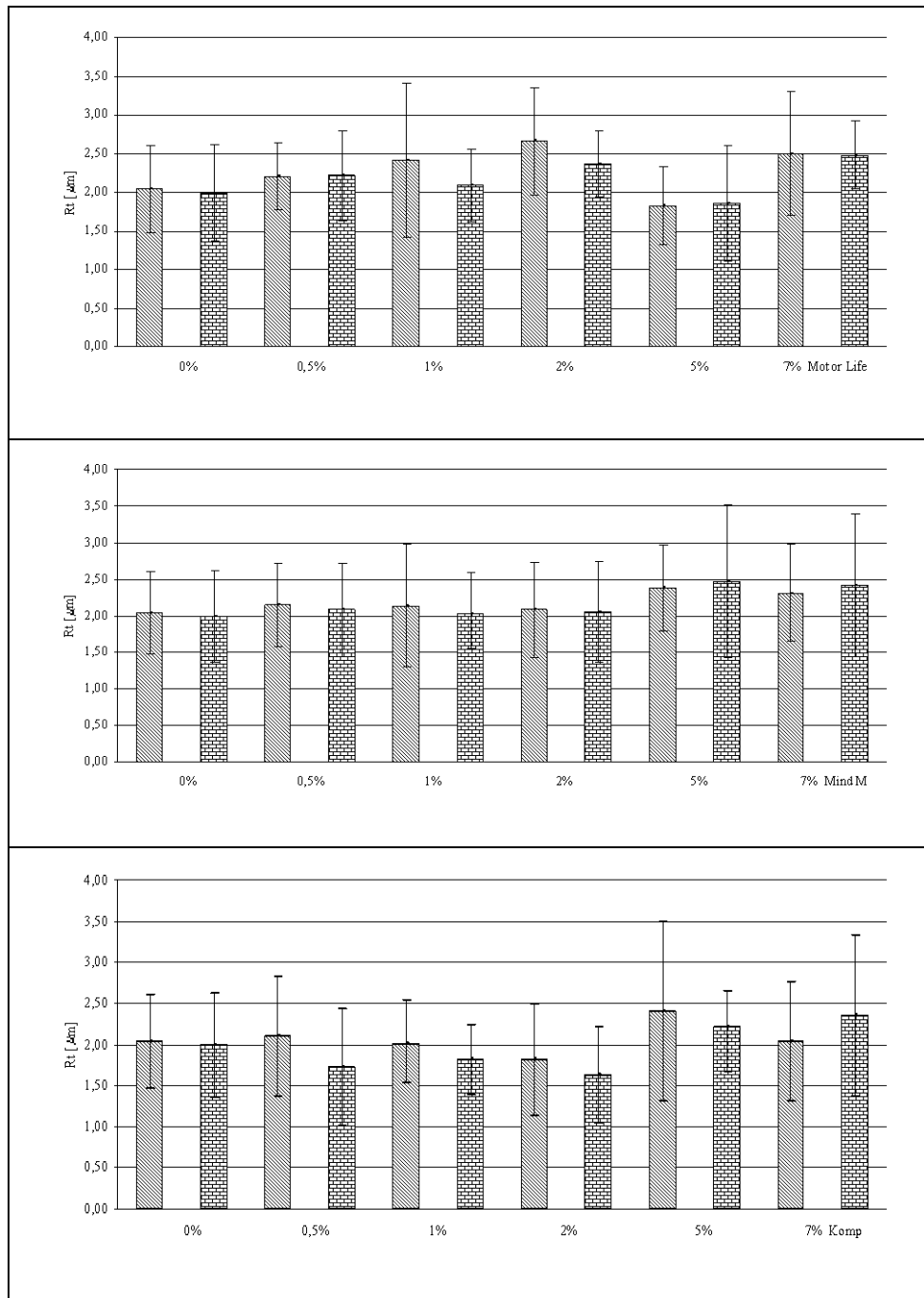
- stężenia PE Motor Life równego: 5%,
- stężenia PE Mind M równego: 7%,
- stężenia PE Komp równego: 7%,


nastąpił wzrost wartości parametru Rt po zużyciu. Przyczyną takiego stanu może być trudność wydostawania się produktów zużycia z przestrzeni roboczej współpracujących powierzchni spowodowana stosunkowo dużym stężeniem badanych dodatków. Dla pozostałych stężeń i rodzajów PE parametr Rt nie zmienił swojej wartości po zużyciu.

Ostatnim analizowanym parametrem była zredukowana wysokość wzniesień Rpk . Jest to średnia wysokość wzniesień wystających ponad profil rdzenia chropowatości. Rpk jest więc średnią wysokością górnej części profilu powierzchni, tj. wzniesień profilu wystających ponad jego rdzeń. Wyznaczając go jako wartość średnią, redukuje się wpływ nietypowych wartości elementów chropowatości (szczególnie wysokich wzniesień) na ten parametr. Rpk charakteryzuje podatność par tarcia na docieranie. Gdy wartość tego parametru jest mała, wówczas skraca się czas docierania, a jednocześnie prawdopodobieństwo wystąpienia zacierania w tym okresie jest dużo mniejsze niż wówczas, gdy wartość Rpk jest duża. Stwierdzono (rys. 5.4), że w wyniku procesu eksploatacji wartość badanego parametru Rpk zmieniała się następująco:

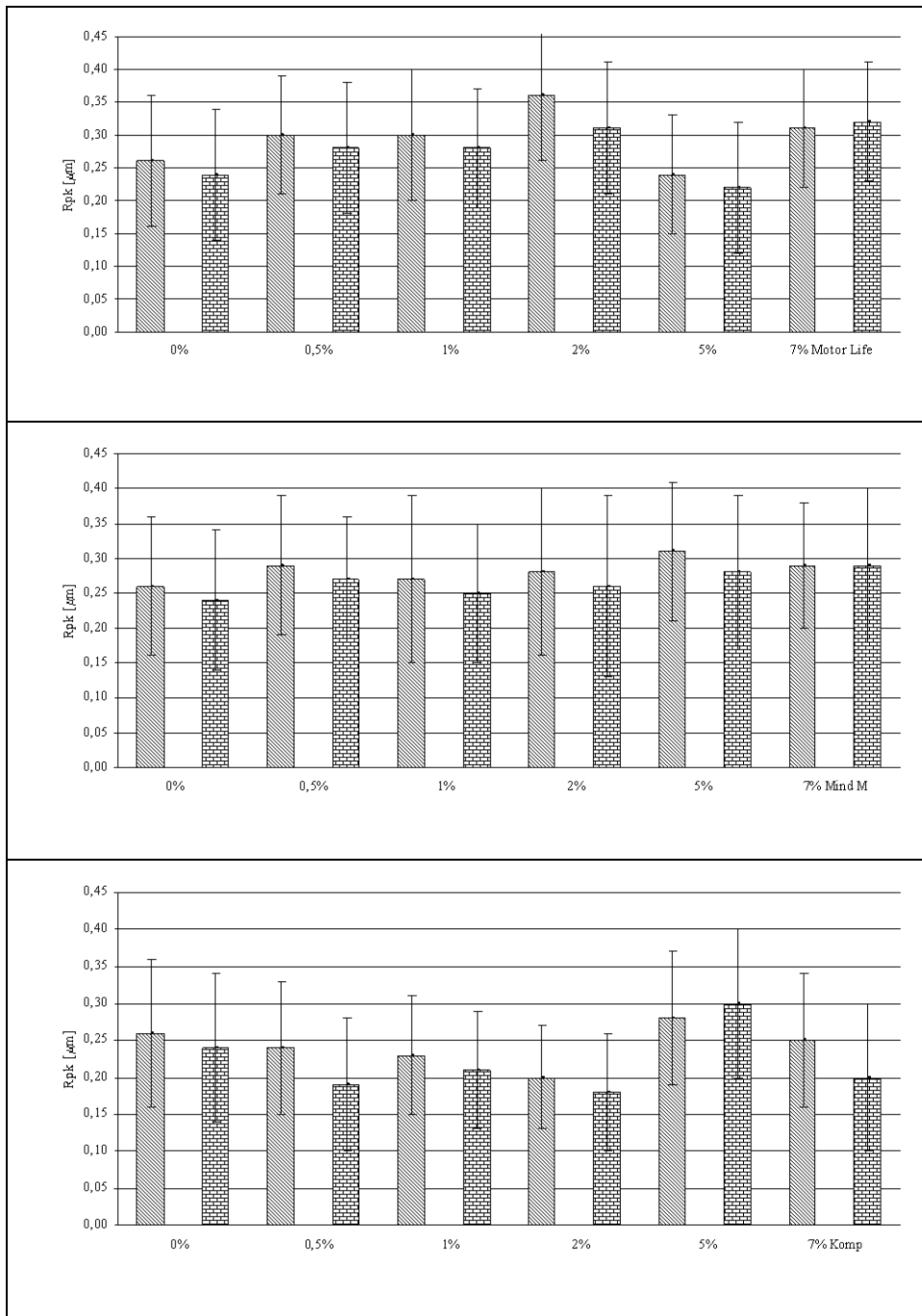
- dla stężeń PE Motor Life w oleju bazowym SN-150 równych: 0%; 0,5%; 1%; 2%; 5% zmniejszył swoją wartość po zużyciu,
- dla stężeń PE Mind M w oleju bazowym SN-150 równych: 0,5%; 1%; 2%; 5% zmniejszył swoją wartość,
- dla stężeń PE Komp w oleju bazowym SN-150 równych: 0,5%; 1%; 2%; 7% zmniejszył swoją wartość po zużyciu.

W/w wyniki świadczą o naturalnym procesie zużywania. Tym samym średnia wysokość wzniesień profilu ponad jego rdzeń zmniejszyła się po zużyciu.



 dla $L=0$ m
  dla $L=2000$ m

Rys. 5.3. Zmiana wartości parametru chropowatości R_t dla różnych stężeń PE przy prędkości v_1



▨ dla $L=0$ m

▤ dla $L=2000$ m

Rys. 5.4. Zmiana wartości parametru chropowatości R_{pk} dla różnych stężeń PE przy prędkości v_1

Stwierdzono również, że dla:

- stężenia PE Motor Life równego 7%,
- stężenia PE Komp równego: 5%,

nastąpił wzrost wartości parametru R_{pk} po zużyciu. Przyczyną mogło być mikroskrawanie powierzchni produktami zużycia występujące dla dużych stężeń dodatków. Dla pozostałych stężeń i rodzajów PE parametr R_{pk} nie zmienił swojej wartości po zużyciu. Dla wszystkich badanych PE wartość tego parametru jest mała i nie przekracza wartości $0,40 \mu\text{m}$. Tym samym prawdopodobieństwo wystąpienia zacierania w okresie docierania powinno być małe. Wraz ze wzrostem stężeń badanych PE nie zaobserwowano regularnego zmniejszania wartości parametru R_{pk} . Trudno na tej podstawie stwierdzić, czy wzrostowi stężeń badanych PE towarzyszy skracanie czasu (drogi) docierania.

Podobny cykl badań przeprowadzono przy większej prędkości ruchu względnego, tzn. $v_2 = 0,16 \text{ m/s}$. Zmiany wartości parametru R_q dla tej prędkości przedstawiono na rys. 5.5. Stwierdzono, że w wyniku procesu eksploatacji wartość badanego parametru zmieniała się następująco:

- dla stężeń PE Motor Life w oleju bazowym SN-150 równych: 1%; 2%; 7% zmniejszył swoją wartość po zużyciu,
- dla stężeń PE Mind M w oleju bazowym SN-150 równych: 1%; 2%; 5%; 7% zmniejszył swoją wartość po zużyciu,
- dla stężeń PE Komp w oleju bazowym SN-150 równych: 1%; 2%; 5%; 7% zmniejszył swoją wartość po zużyciu.

W/w wyniki świadczą o trendzie do zmniejszania się parametru R_q po zużyciu, co można przyjąć jako zjawisko naturalne. Stwierdzono również, że dla:

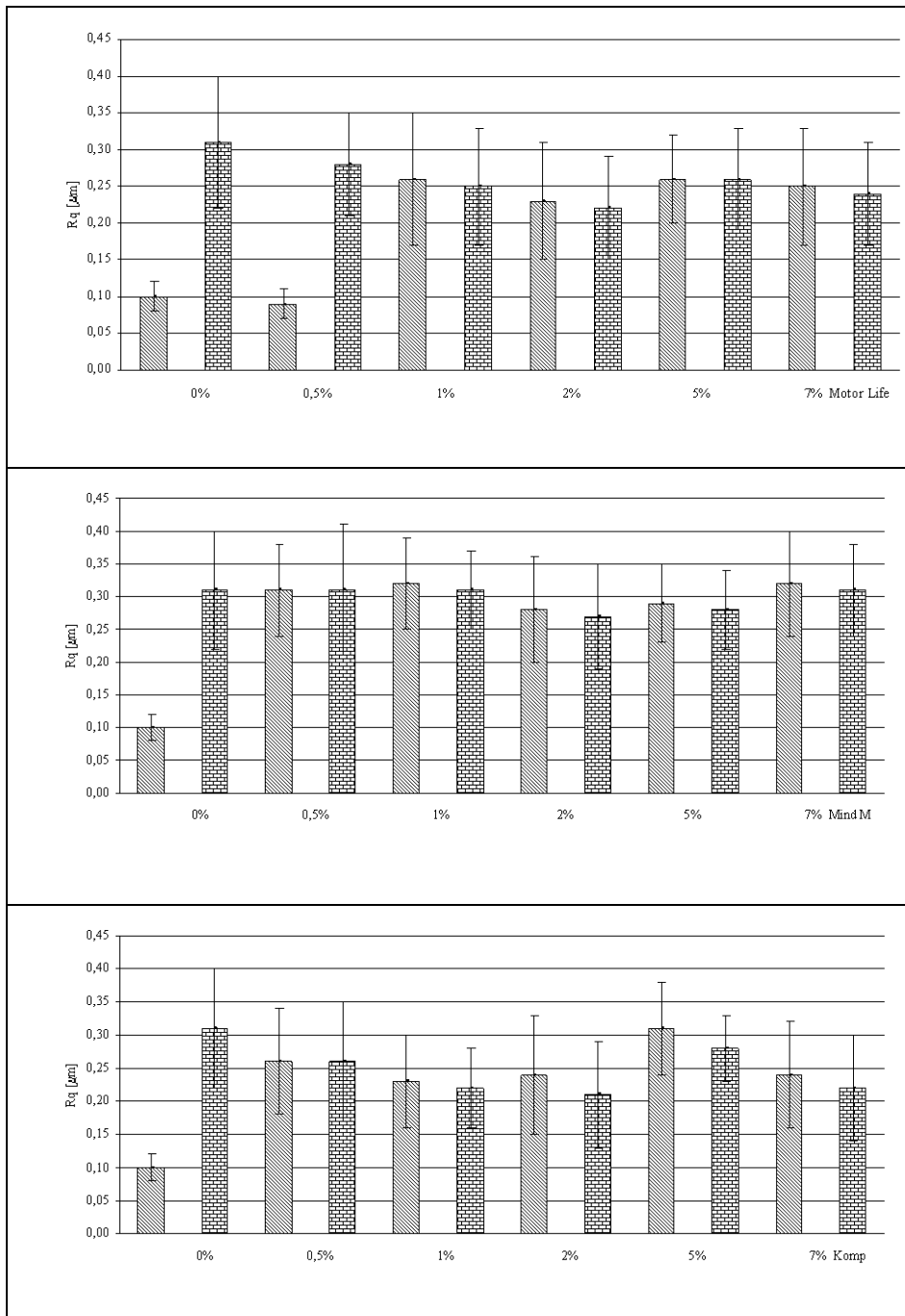
- stężenia PE Motor Life równego: 0,5%,

nastąpił wzrost wartości parametru R_q po zużyciu i był on porównywalny z wynikiem otrzymanym dla czystej bazy olejowej SN-150. Można więc stwierdzić, że małe stężenie tego PE ma niewielki wpływ na zmianę parametru R_q . Dla pozostałych badanych stężeń i rodzajów PE parametr R_q nie zmienił swojej wartości po zużyciu.

Stwierdzone w badaniach zmiany wartości parametru R_a przy prędkości v_2 przedstawiono na rys. 5.6. W wyniku procesu eksploatacji wartość badanego parametru R_a zmieniała się następująco:

- dla stężeń PE Motor Life w oleju bazowym SN-150 równych: 1%; 2%; 7% zmniejszył swoją wartość po zużyciu,
- dla stężeń PE Mind M w oleju bazowym SN-150 równych: 1%; 2%; 7% zmniejszył swoją wartość po zużyciu,
- dla stężeń PE Komp w oleju bazowym równych: 1%; 2%; 5% i 7% zmniejszył swoją wartość po zużyciu.

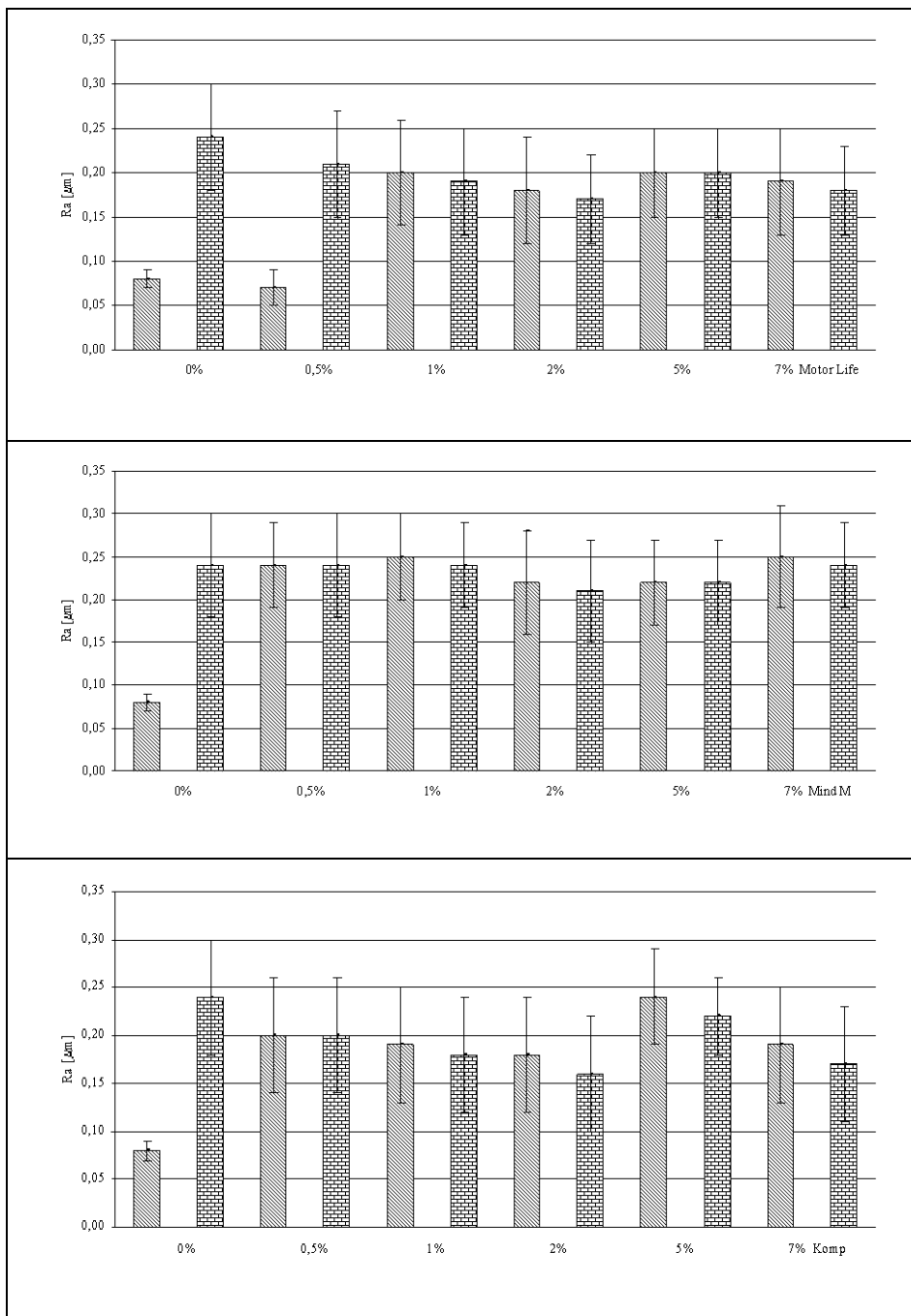
W/w wyniki świadczą o trendzie do zmniejszania się parametru R_a po zużyciu przy prędkości v_2 , co można przyjąć jako zjawisko naturalne.



▨ dla $L=0$ m

▣ dla $L=2000$ m

Rys. 5.5. Zmiana wartości parametru chropowatości R_q dla różnych stężeń PE przy prędkości v_2



▨ dla $L=0$ m

▣ dla $L=2000$ m

Rys. 5.6. Zmiana wartości parametru chropowatości R_a dla różnych stężeń PE przy prędkości v_2

Stwierdzono również, że dla:

- stężenia PE Motor Life równego 0,5%,

nastąpiło zwiększenie wartości parametru Ra po zużyciu. O ile zmniejszenie wartości parametru Ra będącą zmniejszeniem średnich arytmetycznych bezwzględnych wartości rzędnych profilu chropowatości $R(x)$ można wytłumaczyć naturalnym procesem zużycia, o tyle jego wzrost w tym jednym przypadku świadczy o tym, że stężenie PE Motor Life jest zbyt małe, aby uzyskać zauważalny pozytywny efekt, tj. zmniejszenia parametru Ra po zużyciu.

Podobnie jak dla prędkości v_1 także dla większej prędkości v_2 dokonano analizy relacji między parametrami Rq i Ra . Założono więc, że rozkłady rzędnych tych parametrów mają rozkład normalny, dla którego zachodzi relacja $Rq = 1,25Ra$. Na podstawie analizy uzyskanych wyników stwierdzono, że zarejestrowane relacje – Tabele 5.3 i 5.4 są podobne do wartości literaturowej. Świadczy to o tym, że rzędne analizowanych parametrów mają rozkład zbliżony do rozkładu normalnego.

Zmiany kolejnego analizowanego parametru Rt zaobserwowane przy prędkości v_2 przedstawiono na rys. 5.7. Stwierdzono, że w wyniku procesu eksploatacji wartość badanego parametru Rt zmieniała się następująco:

- dla stężeń PE Motor Life w oleju bazowym SN-150 równych: 1% i 7% zmniejszył on swoją wartość po zużyciu,
- dla stężeń PE Mind M w oleju bazowym SN-150 równych: 1% zmniejszył swoją wartość po zużyciu,
- dla stężeń PE Komp w oleju bazowym SN-150 równych: 1%; 2%; 5%; 7% zmniejszył swoją wartość po zużyciu.

Tabela 5.3. Średnie wartości krotności parametru Rq dla badanych preparatów przy prędkości v_2

Badany PE	Krotność Rq przed zużyciem	Krotność Rq po zużyciu
PE Motor Life + SN-150	1,30 Ra	1,33 Ra
PE Mind M+ SN-150	1,29 Ra	1,29 Ra
PE Komp+ SN-150	1,28 Ra	1,28 Ra

Tabela 5.4. Wartości zmierzonych parametrów Rq i Ra dla różnych stężeń PE przy prędkości v_2

Środek smarowy	Stężenia, %	Rq przed zużyciem, μm	Ra przed zużyciem, μm	Krotność Rq przed zużyciem	Rq po zużyciu, μm	Ra po zużyciu, μm	Krotność Rq po zużyciu
SN-150	0%	0,10	0,08	1,25	0,31	0,24	1,30
PE Motor Life + SN-150	0,5%	0,09	0,07	1,29	0,28	0,20	1,40
	1%	0,26	0,20	1,30	0,25	0,19	1,32
	2%	0,23	0,18	1,28	0,22	0,17	1,29
	5%	0,26	0,20	1,30	0,26	0,20	1,30
	7%	0,25	0,19	1,32	0,24	0,18	1,33
PE Mind M + SN-150	0,5%	0,31	0,24	1,29	0,31	0,24	1,29
	1%	0,32	0,25	1,28	0,31	0,24	1,29
	2%	0,28	0,22	1,27	0,27	0,21	1,29
	5%	0,29	0,22	1,32	0,28	0,22	1,27
	7%	0,32	0,25	1,28	0,31	0,24	1,29
PE Komp + SN-150	0,5%	0,26	0,20	1,30	0,26	0,20	1,30
	1%	0,23	0,19	1,21	0,22	0,18	1,22
	2%	0,24	0,18	1,33	0,21	0,16	1,31
	5%	0,31	0,24	1,29	0,28	0,22	1,27
	7%	0,24	0,19	1,26	0,22	0,17	1,29

W/w wyniki świadczą o naturalnym procesie zużycia. Przy czym dla badanych warunków przeprowadzonych doświadczeń ta ostatnia kompozycja najkorzystniej wpływa na zmniejszenie wartości parametru R_t , czyli na zmniejszenie całkowitej wysokości profilu chropowatości, przy prędkości ruchu względnego v_2 . Stwierdzono również, że dla:

- stężenia PE Motor Life równego: 0,5%; 2%,
- stężenia PE Mind M równego: 0,5%,

nastąpił wzrost wartości parametru R_t po zużyciu. Przyczyną mogły być powstałe zarysowania współpracujących powierzchni produktami zużycia spowodowane nieodpowiednim smarowaniem. Małe stężenia PE Motor Life i Mind M przy prędkości ruchu względnego v_2 nie zapewniają dostatecznej ochrony współpracujących powierzchni w procesie zużywania. Dla pozostałych badanych stężeń i rodzajów PE parametr R_t nie zmienił swojej wartości po zużyciu.

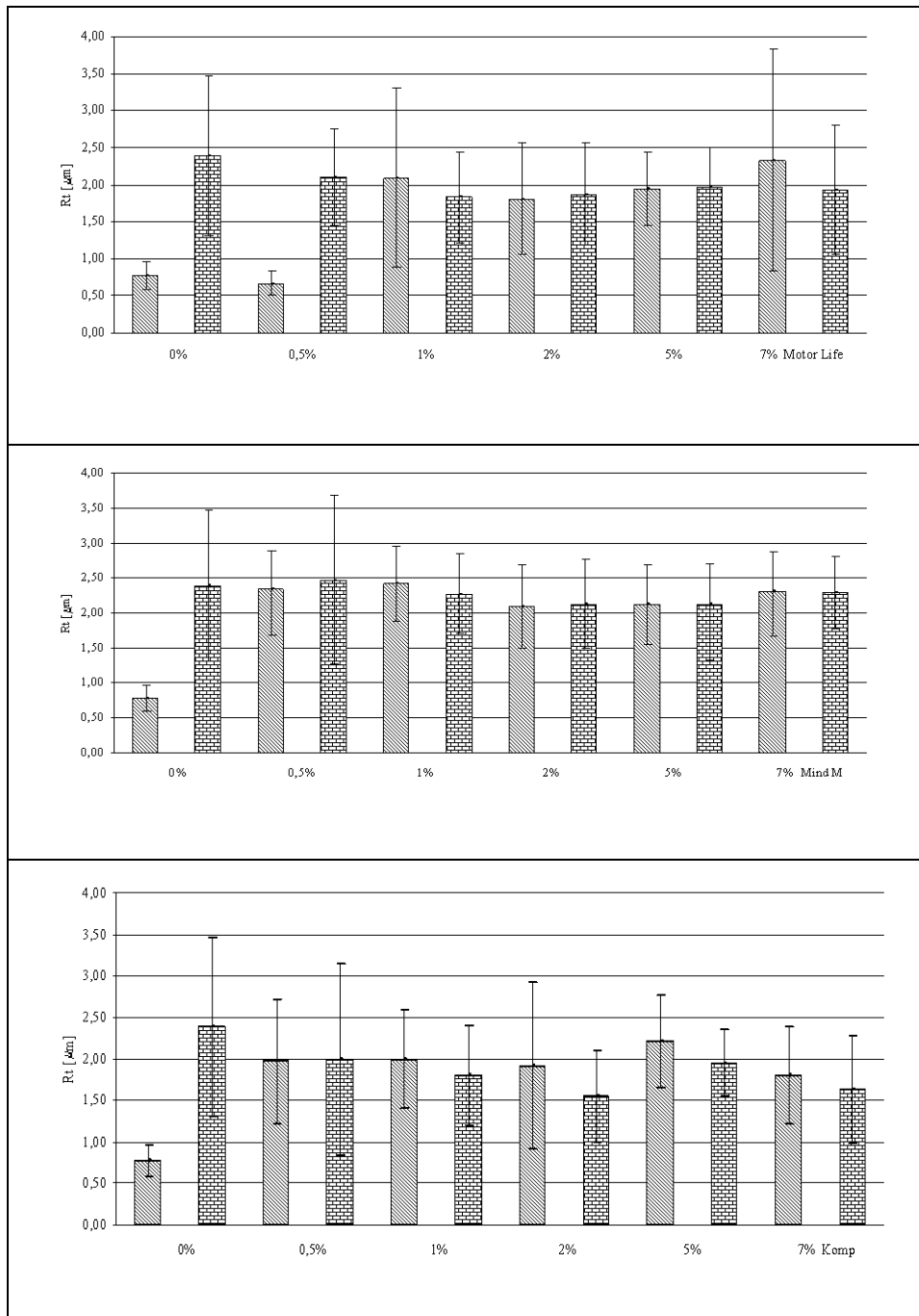
Zmiany ostatniego z analizowanych parametrów opisujących stan SGP – zredukowanej wysokości wzniesień R_{pk} przy prędkości ruchu względnego v_2 przedstawiono na rys. 5.8. Stwierdzono, że w wyniku procesu eksploatacji wartość badanego parametru R_{pk} zmieniła się następująco:

- dla stężeń PE Motor Life w oleju bazowym SN-150 równych: 1% i 7% parametr ten zmniejszył swoją wartość po zużyciu,
- dla stężeń PE Mind M w oleju bazowym SN-150 równych: 0,5%; 1%; 2%; 7% zmniejszył również swoją wartość po zużyciu,
- dla stężeń PE Komp w oleju bazowym SN-150 równych: 0,5%; 1%; 2%; 5%; 7% także zmniejszył swoją wartość po zużyciu.

W/w wyniki świadczą o naturalnym procesie zużywania. Tym samym średnia wysokość wzniesień profilu ponad jego rdzeń zmniejszyła się po zużyciu. Przy czym dla badanych warunków przeprowadzonych doświadczeń szczególnie korzystnie ta ostatnia kompozycja wpływa na zmniejszenie wartości parametru R_{pk} nawet przy małych stężeniach. Stwierdzono również, że dla:

- stężenia PE Motor Life równego: 0,5%,
- stężenia PE Mind M równego: 5%,

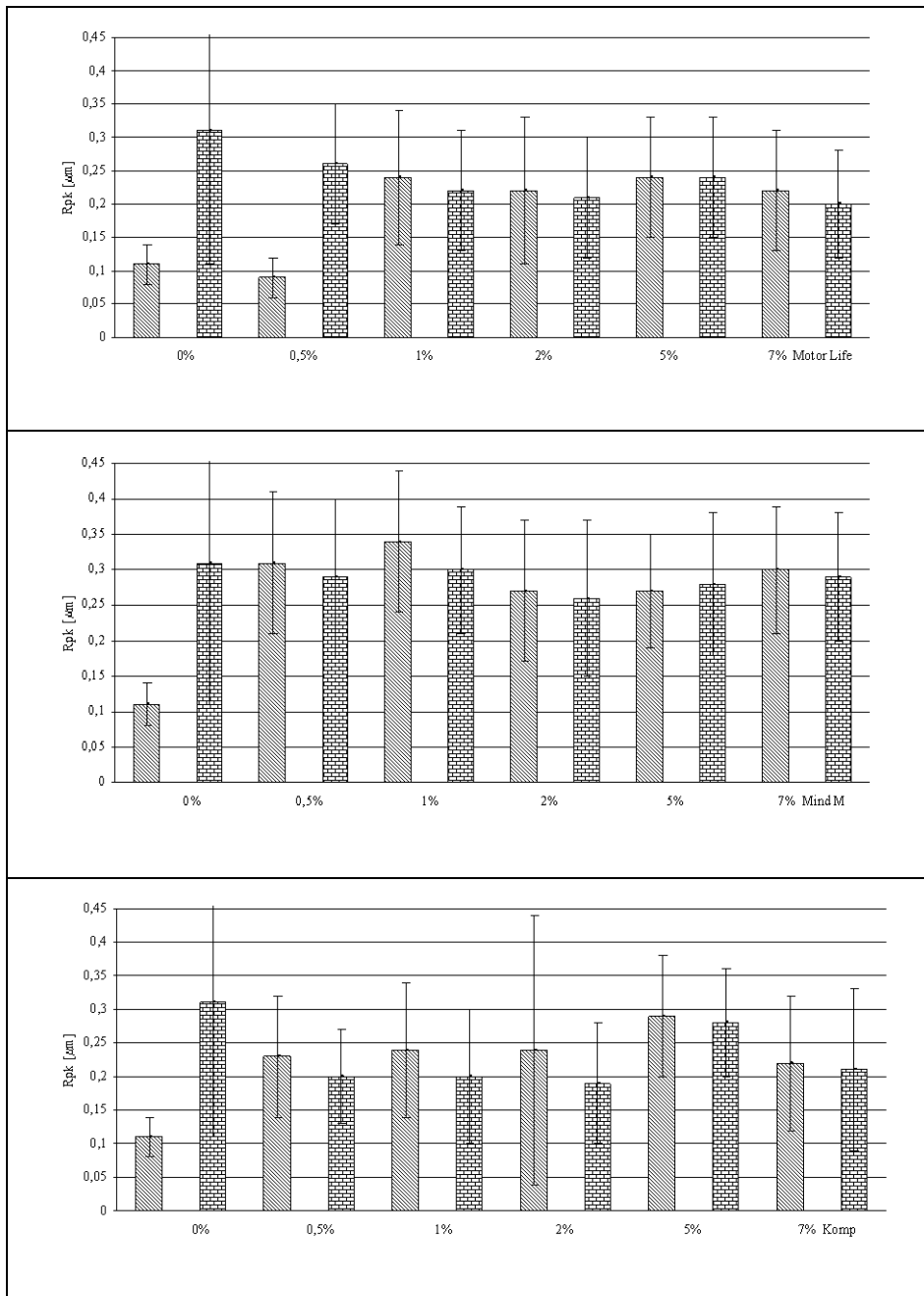
nastąpił wzrost wartości parametru R_{pk} po zużyciu, tym samym w tych przypadkach nie w pełni udało się zabezpieczyć współpracujące powierzchnie przed niekorzystną zmianą wysokości wzniesień profilu ponad jego rdzeń. Dla wszystkich przebadanych tu PE wartość parametru R_{pk} jest mała i nie przekracza wartości $0,35 \mu\text{m}$. Tym samym powinno być małe prawdopodobieństwo wystąpienia zacierania w okresie docierania. Wraz ze wzrostem stężeń badanych PE nie zaobserwowano regularnego zmniejszenia się wartości parametru R_{pk} . Trudno na tej podstawie stwierdzić, czy wzrostowi stężeń badanych PE towarzyszy skracanie czasu (drogi) docierania.



▨ dla $L=0$ m

▣ dla $L=2000$ m

Rys. 5.7. Zmiana wartości parametru chropowatości R_t dla różnych stężeń PE przy prędkości v_2



▨ dla L=0 m

▤ dla L=2000 m

Rys. 5.8. Zmiana wartości parametru chropowatości Rpk dla różnych stężeń PE przy prędkości v_2

Zarówno dla prędkości v_1 jak i v_2 badane PE nie zapewniły całkowitego rozdzielania powierzchni trących się ciał. Tym samym wystąpiło tarcie mieszane, które charakteryzuje się równoczesnym występowaniem tarcia suchego na tych mikropowierzchniach styku, gdzie nastąpiło przerwanie warstewki granicznej środka smarnego, a także warstewki adsorpcyjnej, tarcia granicznego na tych mikropowierzchniach styku, gdzie graniczna warstewka środka smarnego utrzymała się, oraz tarcia płynnego w mikroobszarach styku, gdzie nie wystąpił styk nierówności i są one rozdzielone warstewką środka smarnego. Przyczyną wystąpienia tarcia suchego na mikropowierzchniach styku, mimo, że współpracujące powierzchnie zanurzone są w badanej kompozycji olejowej, może być wystąpienie tzw. krótkotrwałych błysków temperaturowych na mikropowierzchniach, których temperatura osiąga wartość ok. 1000°C.

5.2. Zmiana masy próbek w wyniku procesu zużycia

Kolejną analizowaną wielkością była masa próbek. Podczas procesu zużycia w zdecydowanej większości przypadków ich masa uległa zmniejszeniu.

Na wykresach zawartych w tym podrozdziale przedstawiono zmiany intensywności procesu zużycia, której miarą jest parametr masowy – ubytek masy próbek Δm , w odniesieniu do początkowej masy próbki, po drodze tarcia L .

Zachodzące zmiany zostały zarejestrowane dla tych samych parametrów, jak w przypadku analizy zmian opisanych parametrami geometrycznymi.

Z przedstawionych poniżej wykresów wynika, że minimalny ubytek masy obserwuje się dla dużych stężeń badanych PE, tzn. dla 5% i 7%.

Z uwagi na to, że masa próbek mierzona była tylko na początku i końcu drogi tarcia, dlatego nie można określić jej zmian w funkcji drogi tarcia. Również z tego powodu nie można określić gradientu zmian masy, czy jest inny w początkowym okresie współpracy niż w późniejszym.

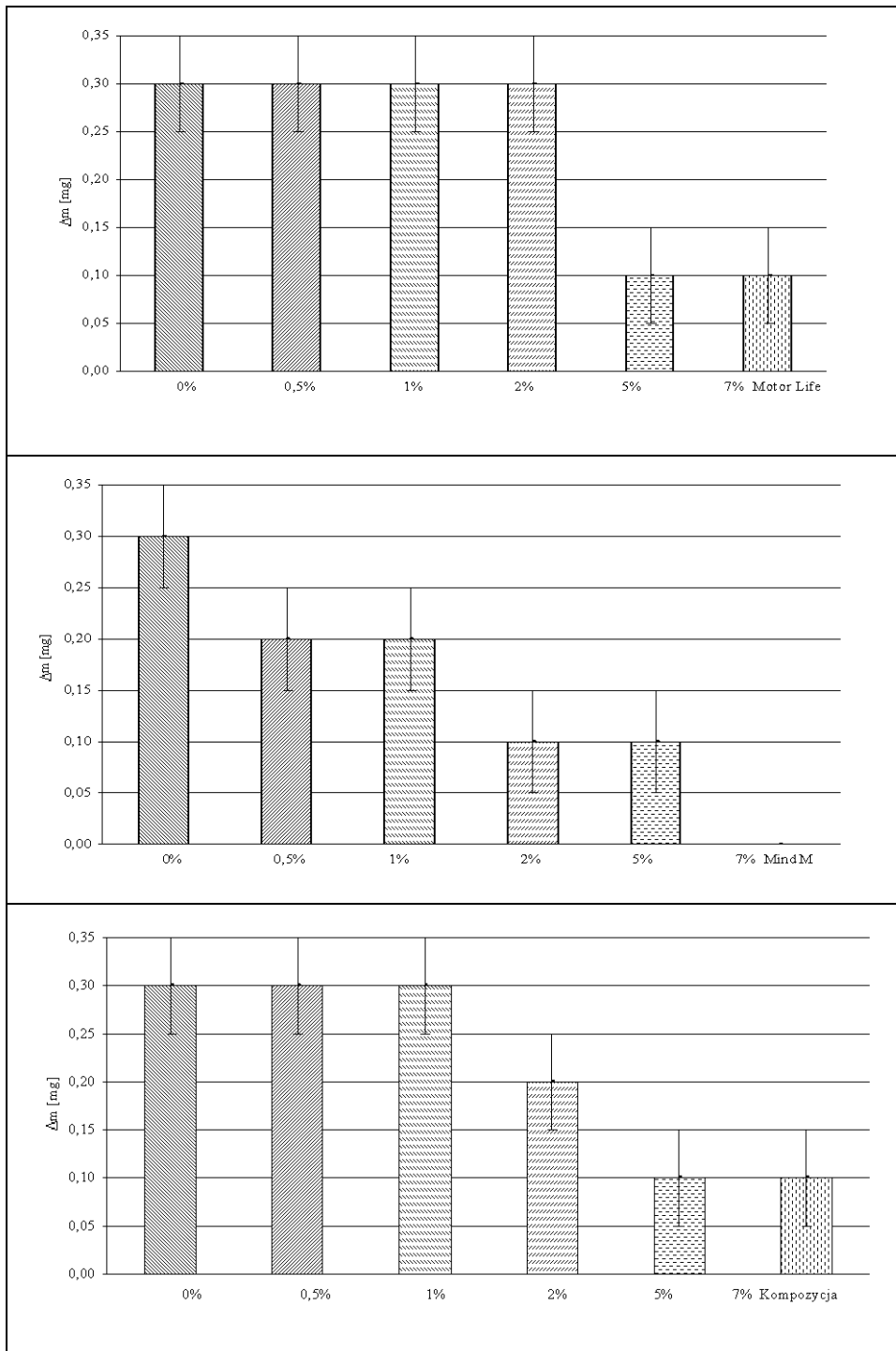
Na podstawie przedstawionych wykresów (rys. 5.10 i 5.11) stwierdzono, że wraz ze zwiększeniem stężeń badanych PE ubytek masy jest stały lub się zmniejsza. Ta reguła obowiązuje zarówno dla prędkości v_1 jak i v_2 . Przy czym ubytek masy dla mniejszej z badanych prędkości (tu $v_1 = 0,08$ m/s) jest większy. Tłumaczyć to należy m.in. gorszym odprowadzeniem produktów zużycia z obszaru tarcia.

Przy prędkości v_2 wszystkie badane PE wykazują podobny ilościowo wpływ na zmianę masy na tej samej drodze tarcia.

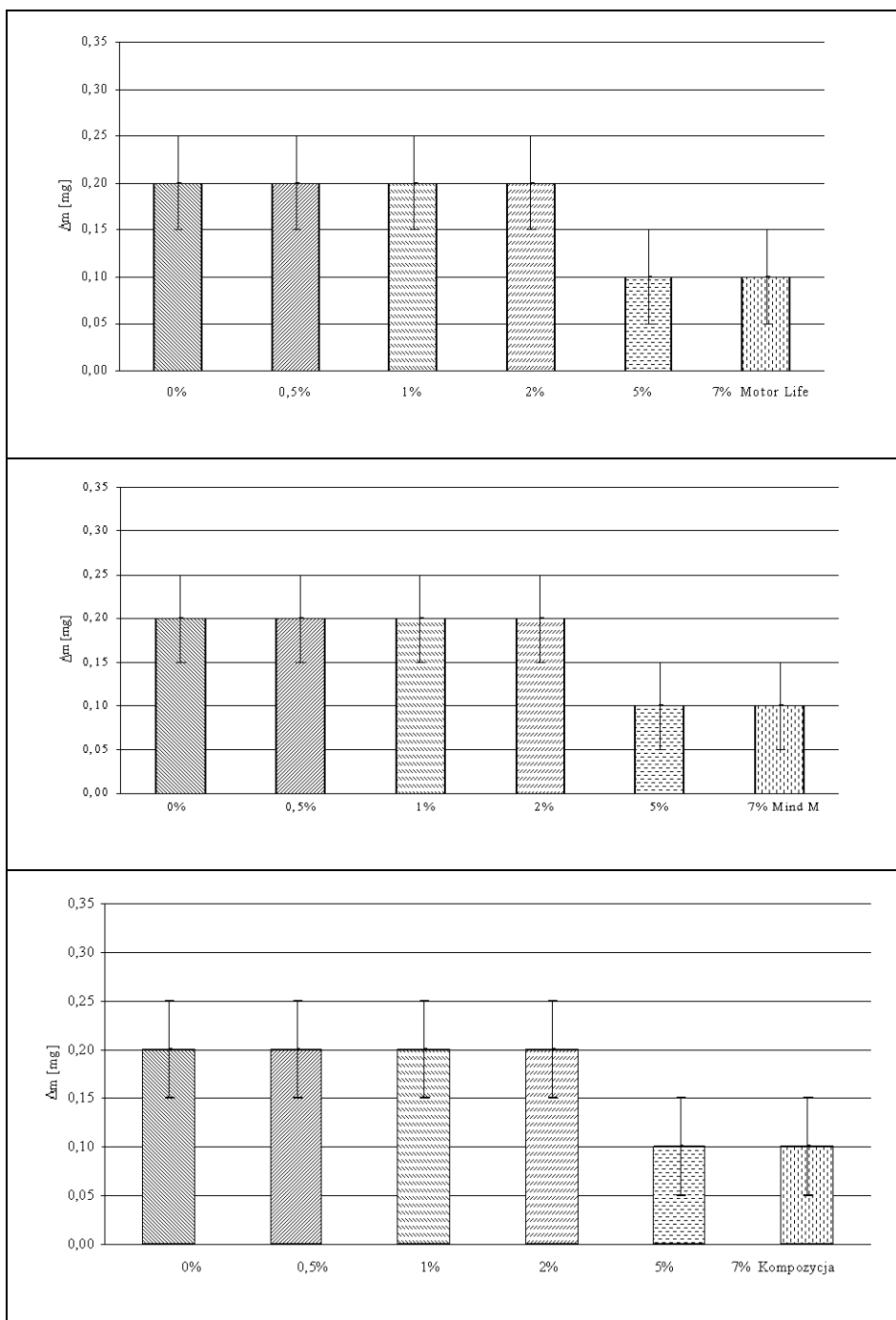
Dla stężeń 5% i 7% badanych PE, tzn. dla Motor Life, Mind M i Kompozycji zmiany parametru Δm są najmniejsze z zaobserwowanych i wynoszą 0,1 mg.

Dla prędkości $v_1 = 0,08$ m/s i 7% Mind M ubytek masy był poniżej czułości wagi, dlatego nie wykazano ubytku, jednak na próbkach widoczne były ślady zużycia.

Zmiana średniej prędkości liniowej z v_1 na v_2 wpływa na zmniejszenie ubytku masy próbek. Spowodowane to jest prawdopodobnie lepszym odprowadzaniem produktów zużycia z przestrzeni roboczej współpracujących elementów oraz lepszym rozprawianiem na powierzchniach tarcia PE.



Rys. 5.10. Zmiana (ubytek) masy próbek Δm dla różnych stężeń PE przy prędkości v_1



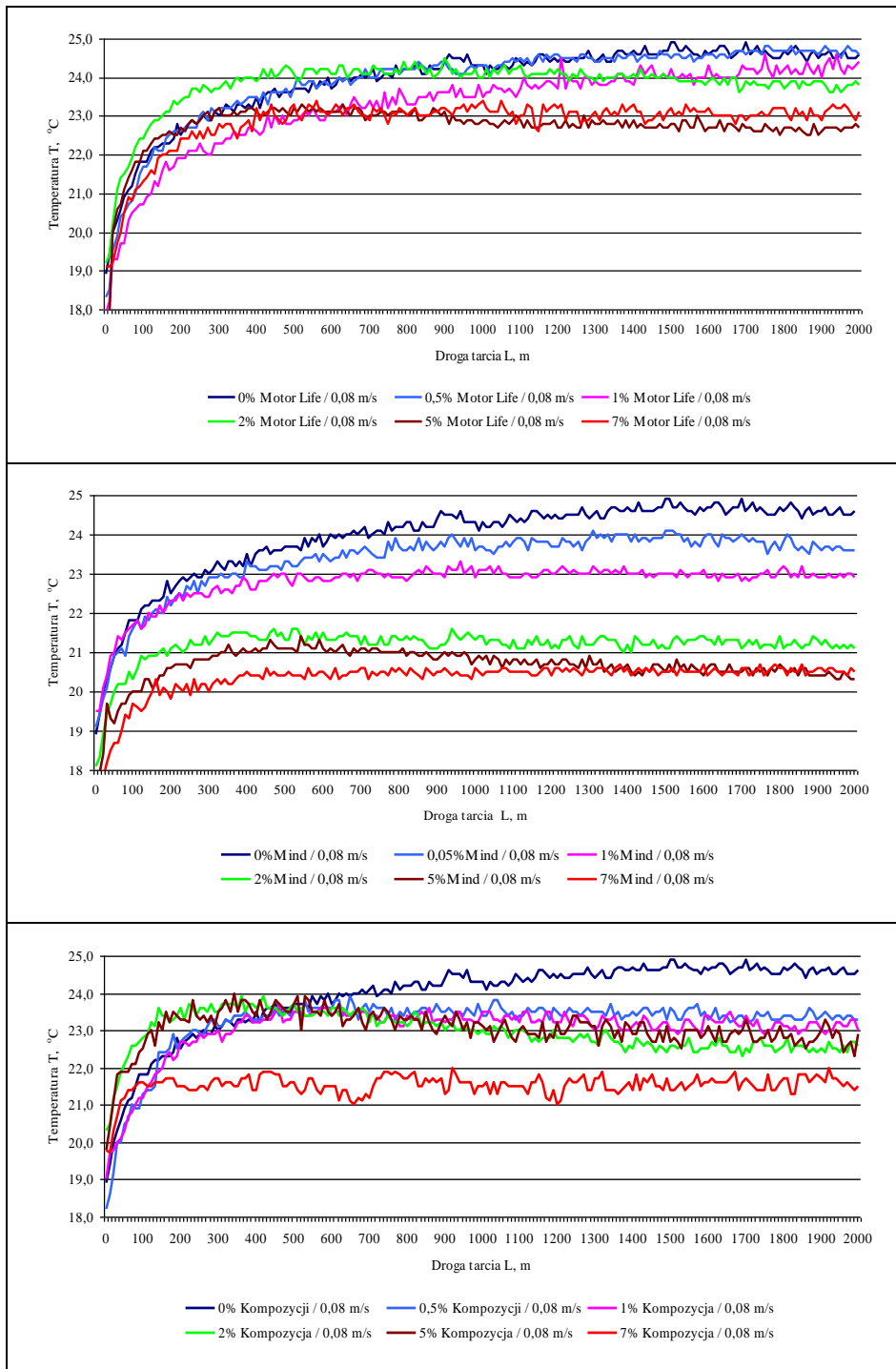
Rys. 5.11. Zmiana (ubytek) masy próbek Δm dla różnych stężeń PE przy prędkości v_2

5.3. Zmiana temperatury a intensywność procesu zużywania

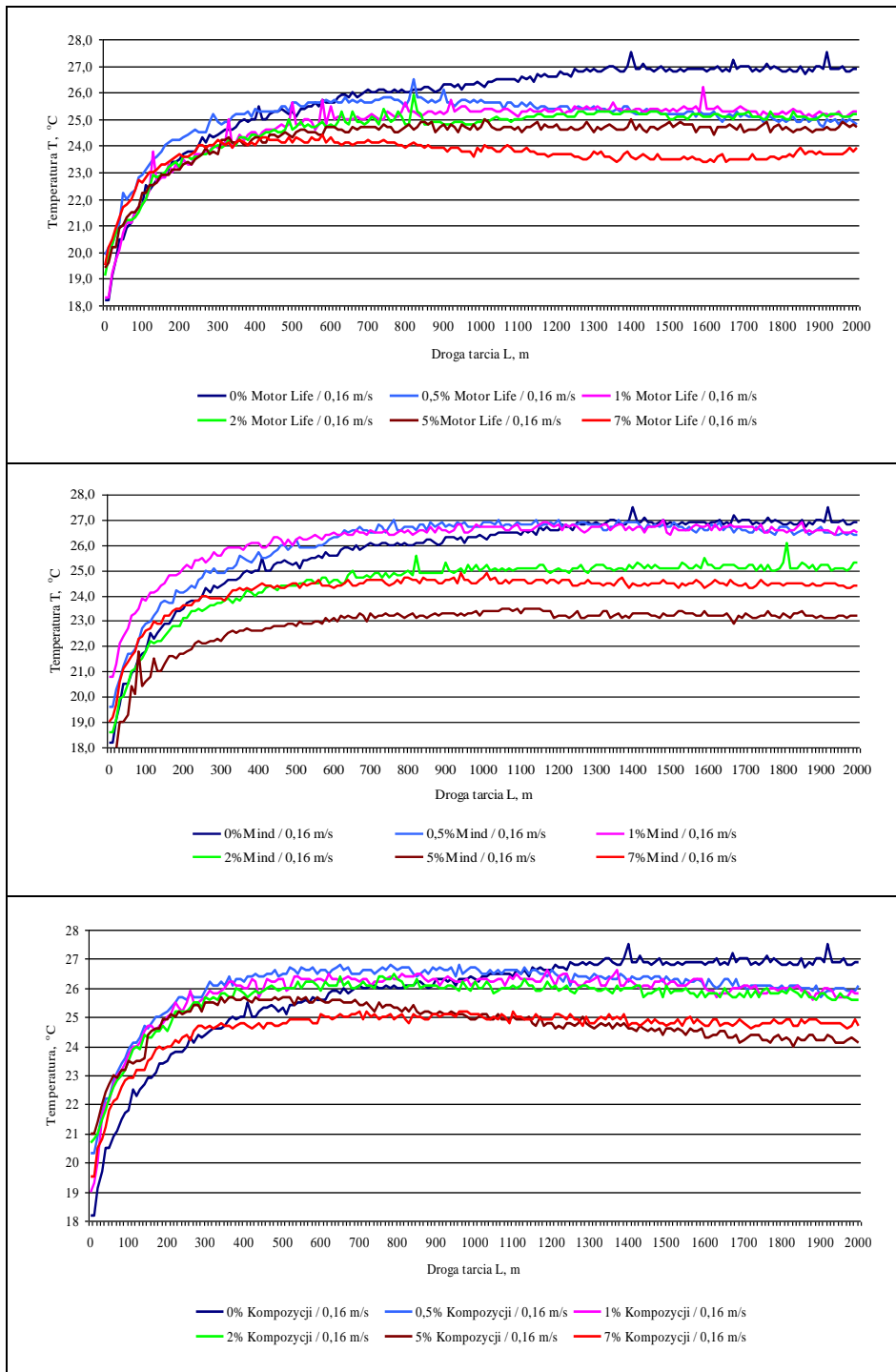
Temperatura współpracujących powierzchni zanurzonych w całej objętości badanej kompozycji olejowej jest ogólną miarą ich stanu cieplnego, jednak nie odzwierciedla faktycznego stanu cieplnego warstwy wierzchniej i styku mikronierówności, zwłaszcza dla dużych gradientów temperatury w głąb materiału. Ciepło generowane podczas tarcia może pozostawać w obrębie systemu tribologicznego i generować zmiany w materiałach współpracujących lub może być odprowadzane z systemu na drodze przewodzenia, konwekcji lub promieniowania. Bilans strumieni energii doprowadzonej i wyprowadzonej z systemu tribologicznego wynosi zero, co jest zgodne z pierwszą zasadą termodynamiki. Udział energii przemienionej w ciepło stanowi największą część energii wyprowadzonej z systemu tribologicznego, osiagającą wg niektórych Autorów [44, 93, 94] nawet ok. 95% jej wartości, dlatego też w celu pełniejszego opisu wpływu badanych dodatków smarowych na intensywność procesu zużywania w parze kinematycznej ze stykiem konforemnym do jej oceny przyjęto zmiany temperatury w komorze olejowej dla badanych stężeń.

Powstawanie ciepła i podwyższenie temperatury elementów współpracujących jest skutkiem działania bardzo dużych nacisków jednostkowych w punktach rzeczywistego stykania się powierzchni oraz towarzyszących procesom tarcia ciągłych odkształceń plastycznych i sprężystych nie tylko szczytów nierówności, ale nawet warstwy podpowierzchniowej. Bowden [44] wykazał doświadczalnie, że w procesie tarcia metali wskutek wysokich temperatur następuje ciągły proces zgrzewania się i rozrywania zgrzanych ze sobą wierzchołków nierówności. Proces ten przebiega bardzo szybko. Pomiar temperatur tarcia potwierdzają, że prędkość ruchu elementów współpracujących ma większy wpływ na temperaturową charakterystykę tarcia, niż obciążenie, co jest widoczne na rysunkach 5.12 i 5.13. Średnia siła tarcia jest wynikiem sumowania wszystkich składowych (elementarnych) sił tarcia towarzyszących zaczepianiu się nierówności powierzchni, tak też średni przyrost temperatury powierzchni tarcia jest średnią temperaturą mikrostryków.

Zachodzące zmiany zostały zarejestrowane dla różnych stężeń badanych PE (0%, 0,5%, 1%, 2%, 5% i 7%) i różnych prędkości liniowych (0,08 m/s i 0,16 m/s). Termopary typu K umieszczone były w komorze olejowej w odległości 5 mm od powierzchni współpracujących.



Rys. 5.12. Zmiana temperatury T w funkcji drogi tarcia L dla różnych stężeń badanych PE przy prędkości v_1



Rys. 5.13. Zmiana temperatury T w funkcji drogi tarcia L dla różnych stężeń badanych PE przy prędkości v_2

Z przedstawionych wykresów wynika, że istotne zmiany temperatury obserwuje się tylko w początkowym okresie współpracy. Po tym okresie, różnym dla różnych stężeń badanych PE, gradient zmian tego parametru jest stały, a zmiany w stosunku do okresu początkowego małe.

Na rys. 5.12 przedstawiono przebieg zmian temperatury T w funkcji drogi tarcia L dla prędkości liniowej $v_1 = 0,08$ m/s. Na podstawie tych zmian można stwierdzić, że:

- zwiększeniu stężenia badanego PE w bazie olejowej SN-150 towarzyszy obniżenie temperatury w końcowym okresie współpracy,
- zakres temperatur dla w/w parametrów mieści się w przedziale od ok. 25°C (dla czystej bazy olejowej) do 20,5°C (dla 7% dodatku Mind M),
- wraz ze wzrostem stężeń badanych PE punkt, w którym temperatura się stabilizuje przemieszcza się w lewo, tzn. droga dotarcia zmniejsza się i wynosi ona dla bazy olejowej SN-150 ok. 1500 m i ok. 150 do 300 m dla 7% stężeń Mind M, Motor Life i Kompozycji,
- najniższe temperatury w końcowym okresie współpracy równe praktycznie temperaturze otoczenia otrzymano dla 7% PE Mind M.

Zmiany temperatury T dla prędkości liniowej $v_2 = 0,16$ m/s (rys. 5.13) były podobne do opisanych wyżej z tym, że:

- osiągnięte temperatury w końcowym okresie współpracy były wyższe i wynosiły od 27°C dla bazy olejowej SN-150 do ok. 23°C dla 7% stężeń badanych PE,
- zwiększeniu stężeń badanych PE towarzyszy zmniejszenie drogi dotarcia z ok. 1500 m (baza olejowa SN-150) do ok. 400 m (7% Motor Life) oraz obniżenie temperatury w końcowym okresie współpracy.

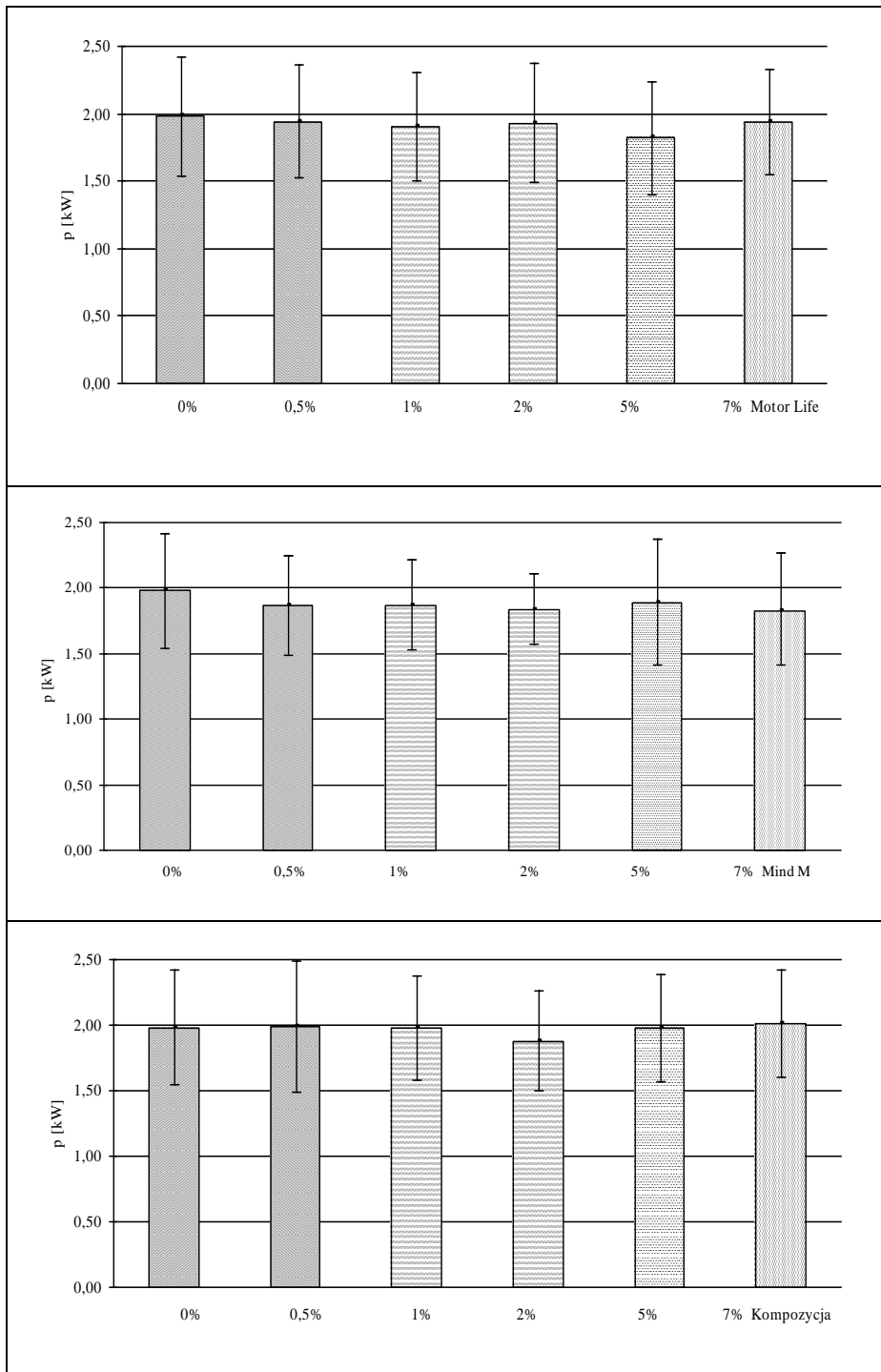
Często, zarówno dla v_1 jak i v_2 , zwiększeniu stężenia z 5% na 7% nie towarzyszy już dalsze obniżenie temperatury, lecz nawet jej niewielki wzrost.

5.4. Zmiana poboru mocy podczas procesu zużywania

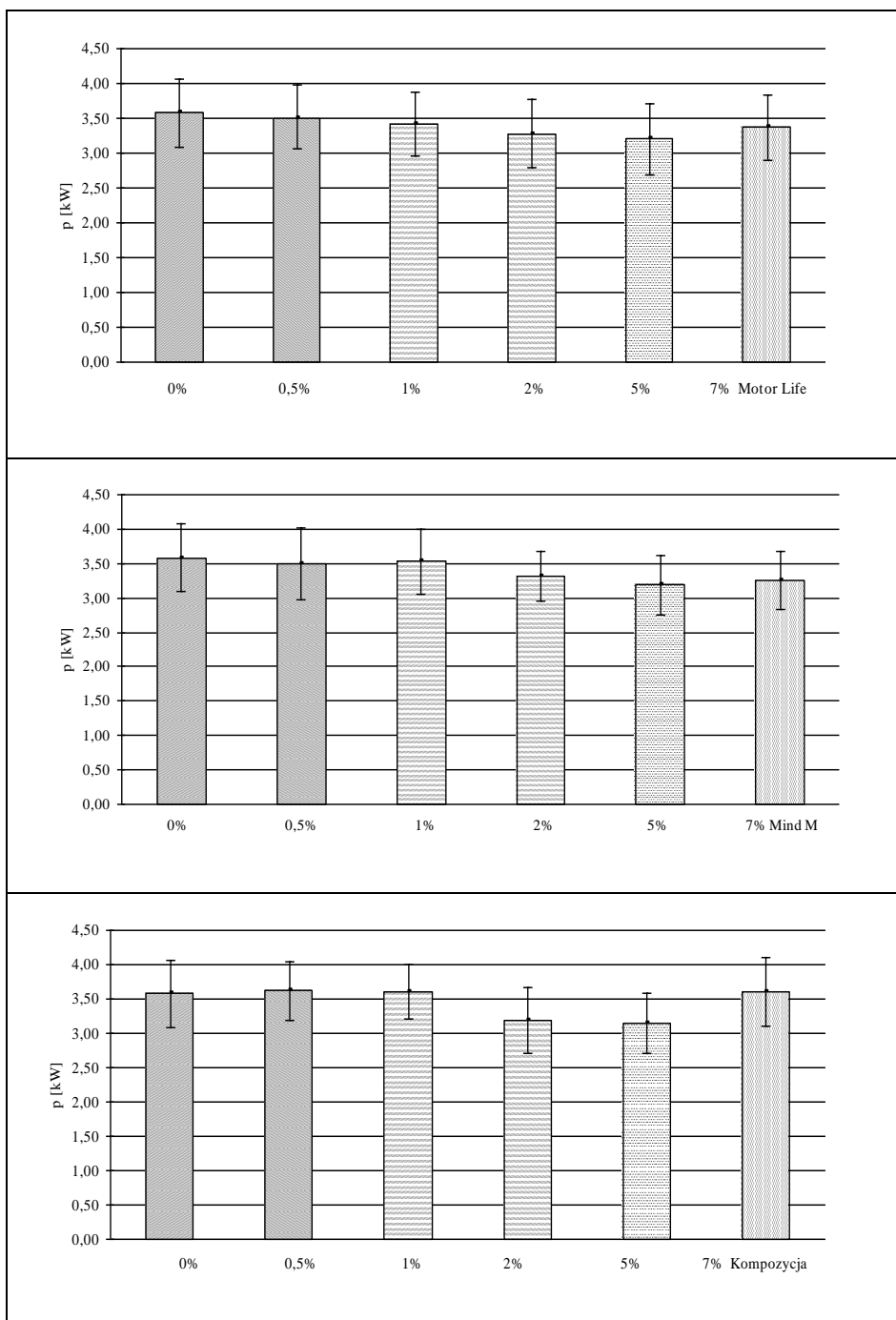
Realizacja założonych funkcji przez każdą parę kinematyczną w procesie eksploatacji wymaga dostarczenia energii. Część tej energii wykorzystywana jest do realizacji zadań, a część – stanowi straty energetyczne. Od relacji między obydwoma częściami zależy sprawność pary kinematycznej. Ponieważ dla realizacji określonej funkcji niezbędna jest zdefiniowana, stała ilość energii więc w wyniku monitorowania energii pobieranej przez układ można obserwować jego straty energetyczne. Duża część strat energii dyssypuje do otoczenia w formie ciepła. Tym samym przebieg poboru mocy jest niejako sprzężony z przebiegiem temperatury. Z tego powodu do opisu wpływu badanych PE na intensywność procesu zużywania przyjęto pobór mocy elektrycznej oraz jej zmiany w funkcji drogi tarcia. Dla badanych stężeń i rodzajów PE ten ma lepsze właściwości tribologiczne, dla którego pobór mocy był mniejszy przy stałych pozostałych parametrach. Mniejszy pobór mocy równoznaczny jest z niższymi temperaturami układu tribologicznego – mniejsze są straty energetyczne będące skutkiem pracy tarcia.

Na rys. 5.14 i 5.15 przedstawiono wartości poboru mocy elektrycznej czynnej dla różnych stężeń badanych PE. Na ich podstawie można stwierdzić, że dla stężeń 2%, 5% i 7% występuje zmniejszenie poboru mocy w stosunku do czystej bazy olejowej SN-150. Dotyczy to zarówno prędkości v_1 jak i v_2 . Większej z badanych prędkości towarzyszy większy o ok. 75% pobór mocy.

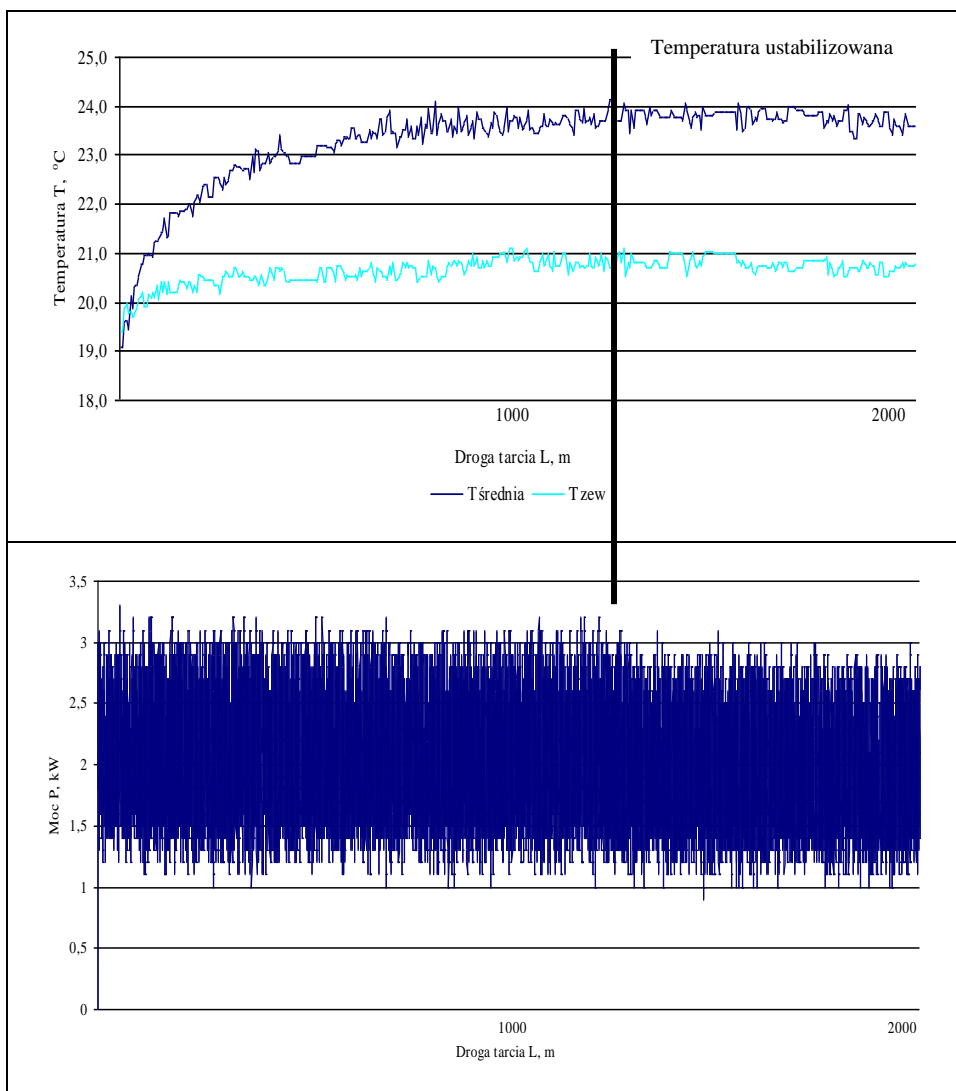
Należy zauważyć, że przebiegi poboru mocy charakteryzują się znaczną pulsacją (rys. 5.16).



Rys. 5.14. Pobór mocy elektrycznej czynnej P (kW) dla różnych stężeń badanych PE przy prędkości v_1



Rys. 5.15. Pobór mocy elektrycznej czynnej P (kW) dla różnych stężeń badanych PE przy prędkości v_2



Rys. 5.16. Przykładowe porównanie przebiegu zmian temperatury i mocy

Zarejestrowane na rysunku szybkie zmiany pobieranej mocy związane są z konstrukcją przyrządu tribologicznego, bezwładnością mas oraz luzami w układzie mechanicznym przyrządu. W chwili ustabilizowania się temperatury następuje zmniejszenie poboru mocy, co świadczy o wspomnianym już ścisłym związku tych dwóch wielkości.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzona analiza informacji literaturowych oraz wyniki zrealizowanych badań pozwoliły określić zarówno w zakresie ilościowym jak i jakościowym wpływ badanych czynników na intensywność procesu zużywania. Na ich podstawie sformułowano szereg wniosków. Poniżej przedstawiono je podzielone na trzy grupy:

- wnioski teoretyczne (poznawcze),
- wnioski praktyczne (użyteczne),
- wnioski rozwojowe, sugerujące kierunki dalszych badań.

6.1. Wnioski teoretyczne

Wnioski z tej grupy mają charakter ogólny. Rozszerzają i weryfikują wiedzę z zakresu i problematyki pracy.

1. Przeprowadzona doświadczalna weryfikacja czynników badanych jakimi były rodzaje i stężenia kompozycji smarującej, wykazała zróżnicowany ich wpływ na intensywność zużywania.
2. Z pozostałych badanych wielkości wejściowych, wspomniana weryfikacja wykazała istotność prędkości ruchu względnego na intensywność zużywania.
3. Na podstawie przeprowadzonych badań, można powiedzieć, że największy wpływ istotnych czynników badanych obserwuje się w początkowym okresie współpracy. Po fazie docierania, następuje stabilizacja zmian i w tej fazie eksploatacji czynniki badane nie wpływają istotnie na zmiany warstwy wierzchniej. Jest to zgodne z naturalnym charakterem procesu eksploatacji.
4. Wraz ze zwiększeniem stężeń badanych PE maleje intensywność zmian czynników opisujących intensywność zużywania. Można to tłumaczyć tym, że zmniejszają się opory w strefie styku. Minimum zmian obserwuje się dla 5% stężeń badanych PE.
5. Wzrost prędkości ruchu względnego powoduje intensyfikację zmian części czynników badanych (np. temperatury, mocy), natomiast nie wpływa na zwiększenie ubytku masy. Potwierdzono w ten sposób złożony mechanizm zużywania w badanych parach kinematycznych o styku konforemnym.

6.2. Wnioski praktyczne

Wnioski zaliczone do tej grupy mają charakter użyteczny. Można je wykorzystać bezpośrednio w praktyce inżynierskiej.

1. Znajomość przebiegu zużywania w obecności czynników badanych można wykorzystać w eksploatacji elementów par kinematycznych w celu jej optymalizacji.

2. Wyniki badań doświadczalnych mogą być pomocne przy projektowaniu i konstruowaniu par kinematycznych z uwzględnieniem środka smarnego.
3. Znajomość procesu zużywania oraz ilościowego opisu relacji istotnych jego parametrów jest przydatnym elementem w projektowaniu procesów eksploatacji obiektów technicznych oraz podczas ich diagnozowania i prognozowania ich stanu.

6.3. Proponowane kierunki dalszych badań oraz podsumowanie pracy

Zrealizowane badania doświadczalne oraz sformułowane wnioski umożliwiają wskazanie kierunków dalszych badań z zakresu tematyki pracy. Zestawiono je poniżej, bez ich hierarchizacji:

1. Prowadzenie prac, które mają na celu opracowanie ujednoczonego zbioru parametrów opisujących w sposób uniwersalny intensywność zużywania. Obecnie, przy bardzo dużej liczbie parametrów opisujących zużywanie, często trudno porównywać wyniki badań i jednoznacznie wnioskować, nawet pomimo zbieżnych warunków badań.
2. Prowadzenie, obok badań szczegółowych, badań o charakterze podstawowym, wyjaśniających zjawiska tribologiczne towarzyszące współpracy elementów par kinematycznych dla różnych PE.
3. W celu uzyskania szerszego zakresu wiedzy o zużywaniu uzależnionym np. od cech struktury geometrycznej powierzchni, celowym wydaje się poszerzenie badań o inne tworzywa konstrukcyjne, szczególnie ze względu na dynamicznie powiększający się ich zbiór. Z tych samych powodów istotnym wydaje się również aspekt zbadania wpływu PE na warunki smarowania takiego węzła ciernego.
4. Prowadzenie prac mających za zadanie zbadanie czy i w jakim stopniu PE wpływają na proces zużywania bezpośrednio po dotarciu, w którym intensywność zużywania jest niemal stała. Czy ten okres ustabilizowanej eksploatacji wydłużają czy też nie?

Proponowane wyżej kierunki dalszych badań są w dużym stopniu zbieżne z aktualnymi trendami w zakresie badań tribologicznych. Propozycje te wynikają z przeprowadzonych badań własnych, potwierdzają więc trafność wyboru tematyki badań.

Uzyskane rezultaty zrealizowanych badań, zarówno analitycznych jak i eksperymentalnych, pozwalają na stwierdzenie, że założony cel pracy został osiągnięty.

LITERATURA

1. Abbott E. J., Firestone F. A. 1993. Specyfing surface quality. [W:] Mechanical Engineering Nr 55, pp. 556÷572.
2. Barre F., Lopez J., Mathia T. G. 1997. New methods for characterising the anisotropy of engineering surfaces. [W:] Trans. 7th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces. Gothenburg, Sweden, pp. 479÷486.
3. Bartz W.J. 2012. Lubrication of industrial gears with synthetic gear oils. [W:] Symposium 2012 Tribologie und Mobilität, s. 37÷38. Wiener Neustadt, Austria.
4. Bejjazycznyj V. F. 2002. Wpływ jakości warstwy wierzchniej po obróbce mechanicznej na właściwości eksploatacyjne części maszyn. [W:] Zagadnienia Eksploatacji Maszyn z. Nr 2, s. 7÷27.
5. Biszcza R., Cichosz P. 2002. Korelacja parametrów chropowatości z wybranymi modelami topografii powierzchni. Instytut Badań i Ekspertyz Naukowych, Gorzów Wlkp.
6. Boryczko A. 1987. Przemieszczenie narzędzia i przedmiotu a zakłócenia struktury geometrycznej powierzchni toczonych. [W:] Mechanik nr 5, s. 211÷214.
7. Burakowski T. 2004. Rozważania o synergizmie w inżynierii powierzchni. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom.
8. Burakowski T. 1998. Rozwój inżynierii powierzchni a rozwój inżynierii eksploatacji. [W:] Tribologia nr 5, s. 829÷843.
9. Burakowski T. 2002. Znaczenie inżynierii powierzchni w tribologii. [W:] Tribologia nr 4, s. 1097÷1111.
10. Burakowski T. 2013. Areologia. Podstawy teoretyczne. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji PIB. Radom.
11. Burakowski T., Marczak R. 1995. Eksploatacyjna warstwa wierzchnia i jej badania. [W:] Zagadnienia Eksploatacji Maszyn z. 3, s. 327÷337.
12. Burakowski T., Marczak R. 1999. Wybrane procesy konstituowania się eksploatacyjnej warstwy wierzchniej. [W:] Tribologia nr 6, s. 757÷765.

13. Burakowski T., Wierchoń T. 1995. Inżynieria powierzchni metali. WNT, Warszawa.
14. Cichosz P., Kowalski M. 2004. Modelowanie matematyczne topografii powierzchni płaskowierzchołkowych typu „plateau”. [W:] Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego nr 36. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, s. 195÷202, Koszalin.
15. Czarnecki H. 2005. Analiza teoretyczna wpływu stereometrii powierzchni na działanie pary tribologicznej. [W:] Tribologia nr 4, s. 19÷31.
16. Daca J., Rudnicki Z., Warszyński M. 2003. Analiza wpływu topografii powierzchni na przebieg zjawisk tribologicznych. [W:] Materiały XXI Sympozjonu PKM, Bielsko–Biała, WNT tom 1, s. 213÷218, Warszawa.
17. Dagnall H. 1986. Exploring surface texture. Rank Taylor Hobson, Leicester.
18. De Chiffre L. 1999. Industrial survey on ISO surface texture parameters. [W:] Annals of the CIRP, 48/3, pp. 463÷466.
19. DIN 4776. Kenngrößen Rk, Rpk, Rvk, Mr₁, Mr₂ zur Beschreibung des Materialanteils im Rauheitsprofil. Messbegingungen und Auswertverfahren.
20. DIN 4761. Oberflächencharakter. Geometrische Oberflächentextur Merkmale. Begriffe, Kurzzeichen.
21. Dong W. P., Sullivan P. J., Stout K. J. 1994. Comprehensive study of parameters for characterizing three–dimensional surface topography. III. Parameters for characterising amplitude and some functional properties. [W:] Wear, Vol. 178, pp. 29÷43.
22. Dong W. P., Sullivan P. J., Stout K. J. 1994. Comprehensive study of parameters for characterizing three–dimensional surface topography. IV. Parameters for characterising spatial and hybrid properties. [W:] Wear, Vol. 178, pp. 45÷60.
23. Duś–Sitek M. 1999. Doświadczalne stwierdzenie istnienia strefy nadpowierzchniowej warstwy wierzchniej – modyfikacja modelu warstwy wierzchniej. [W:] Inżynieria Powierzchni nr 1, s. 29÷34.

24. Feld M., Konczakowski A. 1988. Analiza widmowa struktury geometrycznej powierzchni szlifowanych. Materiały XI Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, s. 109÷116, Łódź.
25. Fleischer G. 1999. Studie zur Energie- und Verschleißverteilung zwischen den Festkörper während der Reibung. Universität Otto von Guericke. Magdeburg.
26. Garkunow D.N. 1987. Effect der Verschleißlosigkeit – eine neue Etappe bei der Verbesserung des Verschleißlosigkeit von Maschinenelementen. [W:] Schmierungstechnik, nr 3.
27. Godet M. 1984. The third body approach: A mechanical view of wear. [W:] Wear, Vol. 100, pp. 437÷452.
28. Górecka R., Polański Z. 1983. Metrologia warstwy wierzchniej. WNT, Warszawa.
29. Handzel–Powierża Z. 1990. Warstwa wierzchnia i problemy jej identyfikacji. Wybrane problemy tribologii. PWN, s. 317÷326, Warszawa.
30. Hebda M., Wachal A. 1980. Trybologia. WNT, Warszawa.
31. Janecki J., Hebda M. 1969. Tarcie, smarowanie i zużycie części maszyn. WNT, Warszawa.
32. Kaczmarek J., Klimczak T. 1986. Dwu- i trójwymiarowa charakterystyka mikronierówności powierzchni. [W:] Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, z. 1, s. 39÷46.
33. Kałdoński T. 1995. Tribologia i płyny eksploatacyjne, cz. II: Wybrane problemy tribologii. Wydawnictwo Wojskowe Akademii Technicznej, Warszawa.
34. Kałdoński T.J., Kałdoński T., Ozimina D. 2008. Wpływ napięcia powierzchniowego, kąta zwilżania i adsorpcji substancji smarnych na ich właściwości smarnościowe. [W:] Tribologia nr 2, s. 235÷246.
35. Kedziora H.–J., Parsons F., Tabenkin A. 2004. Industrial problems with proliferation and expansion of surface finish parameters. Proc. of XI Int. Coll. On Surfaces, pt. 1, pp. 93÷100, Chemnitz.
36. Kolman R. 1965. Mechaniczne wzmacnianie powierzchni części maszyn. WNT, Warszawa.

37. Konczakowska A., Konczakowski A. 1978. Badania struktury geometrycznej powierzchni metodami korelacji i widmowymi. [W:] *Mechanik* nr 6, s. 294÷296.
38. Kośla K., Cichomski M., Kozłowski W. 2012. Preparation and tribological characterization of the organosilanes on aluminium surface. *III Krajowa Konferencja Nano- i Mikromechaniki*, s. 141, Warszawa.
39. Krause H., Schroelkamp Ch. 1981. Investigation into the reaction of metallic bodies in tribological system. *Proc. of Eurotrib'81*, pp. 324÷329, Warsaw.
40. Krawiec S. 2011. Kompozycje smarów plastycznych i stałych w procesie tarcia stalowych węzłów maszyn. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław.
41. Laber S. 2001. Preparaty eksploatacyjne. Wydział Mechaniczny Instytutu Budowy Maszyn i Pojazdów, Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra.
42. Laber S. 2003. Badania własności eksploatacyjnych i smarnych uszlachetniacza metalu Motor Life Professional. Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra.
43. Latoś H. 1999. Podstawy doboru kierunkowości i struktury powierzchni o określonych właściwościach tarciovych. *Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej* nr 74, seria Konferencje nr 34, s. 117÷124, Wrocław.
44. Lawrowski Z. 2009. *Tribologia: tarcie, zużywanie i smarowanie*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
45. Legutko S., Nosal S. 2004. *Kształtowanie technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej*. Ośrodek Wydawnictw Naukowych PAN, Poznań.
46. Li C. G., Dong S., Zhang G. X. 2000. Evaluation of the anisotropy of machined 3D surface topography. [W:] *Wear*, Vol. 237, pp. 211÷216.
47. Lubimow W., Oczóś K. E. 1997. Wybrane zagadnienia kształtowania nierówności powierzchni w procesach obróbkowych. [W:] *Mechanik* nr 3, s. 81÷84.
48. Lubimow W., Oczóś K. E., Łabudzki R. 2000. Klasyfikacja struktur geometrycznych powierzchni (SGP) obrobionych ściernie. W: Oczóś K.

- E. (redakcja) Obróbka ścierna. Podstawy i technika. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, s. 206÷211, Rzeszów.
49. Marczak R. 1993. Postęp w badaniach zjawiska Garkunowa. Materiały konferencji „Problemy bezzużyciowego tarcia w maszynach.” Wydaw. WSI Radom.
 50. Marczak R. 1955. Istota, model i możliwości wykorzystania zjawiska Garkunowa w technice. Materiały Konferencyjne NT. Problemy niekonwencjonalnych układów łożyskowych. Łódź.
 51. Materiały informacyjne PUPH „MIND” Sp. z o.o., Łochowice, 86-005 Białe Błota.
 52. Materiały informacyjne Zakładu „PLASTMAL” Sp. z o.o., Warszawa
 53. Matuszewski M. 2008. Badanie wpływu wybranych parametrów struktury geometrycznej powierzchni elementów par kinematycznych na proces ich zużywania. Rozprawa doktorska. Bydgoszcz.
 54. Matuszewski M. 2013: Kierunkowość struktury geometrycznej powierzchni w transformacji warstwy wierzchniej. Praca habilitacyjna. Rozprawy nr 170. Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego. Bydgoszcz.
 55. Matuszewski M., Mikołajczyk J. 2011. Konstrukcja i sterowanie stanowiska do badań tribologicznych. [W:] CAX’2010, Komputerowe Wspomaganie Nauki i Techniki, VII Warsztaty Naukowe, s. 35÷40, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz.
 56. Mori M., Kumehara H. 1976. Replication of cutting edge roughness on the work surface. [W:] Bull. of Japan Soc. of Precision Engineering, Vol. 10, No. 1, pp. 171÷179.
 57. Mikołajczyk J. 2009. Zestawienie porównawcze dodatków depresujących do olejów. [W:] Zaawansowana tribologia, s. 92÷100. XXX Ogólnopolska Konferencja Tribologiczna. Nałęczów.
 58. Mikołajczyk J. 2009. Zestawienie porównawcze własności fizykochemicznych dodatków smarnych w oleju podstawowym SAE-30. VI Konferencja Naukowo-Techniczna TEROTECHNOLOGIA, s. 74÷79, Kielce.
 59. Mikołajczyk J. 2012. System rejestracji i wizualizacji warunków pracy stanowiska do badań tribologicznych. [W:] CAX’2011, Komputerowe

Wspomaganie Nauki i Techniki, VIII Warsztaty Naukowe, s. 13÷18, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz.

60. Mikołajczyk J. 2012. Badanie wpływu preparatu eksploatacyjnego Mind M na zmianę własności smarnych oleju bazowego SN-150. [W:] Inżynieria i Aparatura Chemiczna nr 5, s. 235÷236.
61. Mikołajczyk J., Styp-Rekowski M., Matuszewski M., Musiał J. 2012. Einfluß der Kompositionen von Schmierzusätzen auf die Exploitations-Eigenschaften der Mischung mit Basisöl SN-150. Symposium 2012 Tribologie und Mobilität, s. 97÷104. Wiener Neustadt, Austria.
62. Mikołajczyk J., Styp-Rekowski M. 2012. The Influence of Mind M Preparation on the Lubricant Properties of Oil SN-150. 53. [W:] Tribologie-Fachtagung, Band I, Vortrag 18. Göttingen, Niemcy.
63. Nosal S. 2012. Tribologia. Wprowadzenie do zagadnień tarcia, zużywania i smarowania. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
64. Nowicki B. 1980. Badania mikrostruktury geometrycznej powierzchni obrobionych i metod jej oceny. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, [W:] Mechanika, z. 70, Warszawa.
65. Nowicki B. 1985. Multiparameter representation of surface roughness. [W:] Wear, Vol. 102, pp. 161÷176.
66. Nowicki B. 1991. Struktura geometryczna: chropowatość i falistość powierzchni. WNT, Warszawa.
67. Nowicki B. 1991. Wpływ struktury geometrycznej powierzchni na własności użytkowe części maszyn. [W:] Mechanik nr 4, s. 148÷149.
68. Nyc R. 2000. Możliwości zastosowania profilometrii skaningowej do interpretacji zużycia elementów maszyn. [W:] Problemy Eksploatacji nr 3, s. 183÷191.
69. Nyc R. 2001. Ocena zużycia współpracujących powierzchni elementów maszyn na podstawie krzywych nośności. [W:] Tribologia nr 3, s.349÷355.
70. Oczóś K. E., Lubimow W. 1998. Analiza w układzie 3D struktury geometrycznej powierzchni szlifowanych. W: Dąbrowski L., Marciniak

M., Nowicki B. (redakcja): Badania podstawowe i techniczne obróbki ścierniej, s. 116÷122. Warszawa.

71. Oczóś K. E., Lubimow W. 1999. Klasyfikacja struktur geometrycznych powierzchni (SGP). [W:] Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej nr 74, s. 149÷154. Wrocław.
72. Oczóś K. E., Lubimow W. 1998. Nowe aspekty trójwymiarowej (3D) analizy chropowatości powierzchni obrobionej. [W:] Mechanik nr 8/9, s. 471÷476.
73. Oczóś K. E., Lubimow W. 2003. Struktura geometryczna powierzchni. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów.
74. Oczóś K. E., Lubimow W. 2008. Rozważania nad istotnością parametrów struktury geometrycznej powierzchni w układzie 3D. [W:] Mechanik nr 3, s. 132÷137.
75. Oczóś K. E., Lubimow W., Łabudzki R. 2001. Analiza porównawcza struktur geometrycznych powierzchni (SGP) po obróbce ścierniej. Zbiór prac XXIV Naukowej Szkoły Obróbki Ścierniej, s. 249÷260. Łopuszna.
76. Oczóś K. E., Lubimow W., Łabudzki R. 2001. Izotropowość i symetryczność SGP. Materiały VI Konferencji N-T „Kształtowanie materiałów niemetalowych”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, s. 293÷302. Rzeszów.
77. Oczóś K.E., Lubimow W. 2008. Rozważania nad istotnością parametrów struktury powierzchni w układzie 3D. [W:] Mechanik 6.
78. Ozimina D. 2000. Metody oceny oddziaływań tribochemicznych dodatków przeciwzatarciowych. [W:] Metrologia i Systemy Pomiarowe nr 1, s. 73÷87.
79. Ozimina D. (red.) 2013. Eksploatacja systemów tribologicznych, t. 2: Tarcie, zużycie, smarowanie wybranych węzłów tribologicznych. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, seria Monografie, studia, rozprawy, z. M49, Kielce.
80. Panicz A. 2000. Chropowatość powierzchni – co nowego?. [W:] Pomiary Automatyka Kontrola nr 5, s. 39÷47.
81. Pawlus P. 2006. Topografia powierzchni: pomiar, analiza, oddziaływanie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów.

82. Peters J. 2001. Contribution of CIRP to the development of metrology and surface quality evaluation during the last fifty years. [W:] Annals of the CIRP, 50/2, pp. 471÷488.
83. Piekoszewski W., Szczerek M., Wiśniewski M. 2000. Charakterystyki tribologiczne chropowatości powierzchni elementów maszyn. [W:] Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, z. 3, s. 43÷69.
84. Pietruszewicz W. 1985. Parametry powierzchni i ich przydatność do określenia cech użytkowych przedmiotu. Materiały Konferencji N-T „Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej”. Poznań – Gorzów Wlkp.
85. PN – EN ISO 1302: 2004. Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Oznaczanie struktury geometrycznej powierzchni w dokumentacji technicznej wyrobu.
86. PN – EN ISO 4287: 1999. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
87. PN – 87/M – 04250: Warstwa wierzchnia. Terminologia.
88. Polański Z.: Metody optymalizacji w technologii maszyn. PWN, Warszawa 1977.
89. Polański Z. 1984. Planowanie doświadczeń w technice. PWN, Warszawa.
90. Płaza S., Margielewski L., Celichowski G. 2005. Wstęp do tribologii i tribochemia. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
91. Rehbein W., Rigo J., Lange I. 2012. Prüfung des Stick-Slip-Verhaltens von Gleitbahnlölen mittels Schwing-Reibverschleiss Tribometer (SRV). [W:] 53. Tribologie-Fachtagung, Vortrag 31, Band I. Göttingen. Niemcy.
92. Rigney D. A., Gleaser W. A. 1978. The significance of near surface microstructure in the wear process. [W:] Wear, Vol. 46, pp. 241÷250.
93. Sadowski J. 2006. Nowa interpretacja i ocena zużycia tribologicznego. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom.
94. Sadowski J. 1997. Termodynamiczne aspekty procesów tribologicznych. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom.

95. Sadowski J. 2003. The thermodynamic theory of friction and wear . Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom.
96. Stachowiak G. W., Batchelor A. W. 2001. Engineering tribology. Butterworth-Heinemann.
97. Starczewski L. 2002. Wodorowe zużywanie ciernych elementów maszyn. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom.
98. Stout K. J., Davis E. J., Sullivan P. J. 1990. Atlas of machined surfaces. Chapman and Hall, London.
99. Stout K. J., Dong W. P., Mainsah E. 1993. A proposal for standartisation of assessment of three–dimensional micro–topography – Part I. Surface digitisation and parametric characterisation. University of Birmingham.
100. Stout K. J., Sullivan P. J., Dong W. P., Mainsah E., Luo N., Mathia T., Zahouani H. 1993. The development of methods for the characterisation of roughness in three–dimensions. Commission of the European Communities.
101. Styp–Rekowski M. 1990. Geometrical constructional features of special rolling bearings against their exploitational properties. Proceedings of IVth Symposium INTERTRIBO '90, Vol. C, pp. 93÷96.
102. Styp–Rekowski M. 2001. Znaczenie cech konstrukcyjnych dla trwałości skośnych łożysk kulkowych. Wydawnictwo Naukowe ATR, seria Rozprawy, nr 103, Bydgoszcz.
103. Styp-Rekowski M., Mikołajczyk J. 2009. Smarowanie w eksploatacji maszyn. Seminarium pt. Twórczość Inżynierska dla Współczesnej Europy, s. 53÷58. Bydgoszcz-Białe Błota.
104. Styp-Rekowski M., Świerk K., Mikołajczyk J. 2010. Modyfikowanie cech środka smarującego za pomocą dodatków i komputerowe wspomaganie ich doboru. [W:] CAX'2009, Komputerowe Wspomaganie Nauki i Techniki, VI Warsztaty Naukowe, s. 15÷19, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz.
105. Styp-Rekowski M., Mikołajczyk J. 2012. Wpływ dodatku na własności smarowe oleju bazowego SN-150. [W:] Tribologia nr 4, s. 227÷232.
106. Styp-Rekowski M., Mikołajczyk J. 2012. Zmiana temperatury na drodze tarcia dla kompozycji olej bazowy SN-150-preparat eksploatacyjny Mind M. III Krajowa Konferencja Nano- i Mikromechaniki Instytutu

Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, s. 145÷146. Warszawa.

107. Szczerek M. 1997. Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom.
108. Szczerek M., Wiśniewski M. (redakcja) 2000. Tribologia i tribotechnika. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom.
109. Szulc L. 1965. Struktura i własności fizyko–mechaniczne obrobionych powierzchni metali. Zeszyt specjalny Politechniki Warszawskiej. Warszawa.
110. Szumniak J. 2001. Warstwa wierzchnia elementów trących. Budowa, własności i ich identyfikacja, wpływ na tarcie. Poradnik tribologii i tribotechniki (4–5), s. 11÷18.
111. Terry A.J., Broun C.A. 1997. A comparison of topographic characterisation parameters in grinding. [W:] Annals of the CIRP, 46/1, pp. 497÷500.
112. Tripp J. H., Ioannides E. 1990. Effects of surface roughness on rolling bearing life. Proceedings of the Japan International Conference. Japanese Society of Tribologists Nagoya, Vol. 2, pp. 797÷804.
113. Tsukada T., Kanad T. 1986. Evaluation of two– and three–dimensional surface roughness. [W:] Wear, Vol. 109, pp. 1÷4.
114. Vorburger T.V. at all. 1997. Characterisation of surface topography. [W:] Annals of the CIRP, 46/2, pp. 597÷615.
115. Walicka A. 2002. Reodynamika przepływu płynów nienewtonowskich w kanałach prostych i zakrzywionych. Wydawnictwo Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra.
116. Walicki E., Walicka A. 1998. Reologia wybranych płynów smarujących. Materiały Zebrania SPE KBM PAN, s. 137÷144, Zielona Góra.
117. Whitehouse D.J. 1978. Surfaces – a link between manufacture and function. Proc. Inst. Mech. Engrs., 192, pp. 179÷188.
118. Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J. 1996. Charakterystyka chropowatości powierzchni. Politechnika Poznańska, Poznań.

119. Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J. 2003. Przewodnik po pomiarach nierówności powierzchni czyli o chropowatości i nie tylko. Politechnika Poznańska, Poznań.
120. Williams J. 2005. Engineering tribology. Cambridge University Press, Cambridge.
121. Willis E. 1986. Surface finish in relation to cylinder liners. [W:] Wear, Vol. 109, pp. 351÷366.
122. Wiśniewski M. 2001. Parametry chropowatości powierzchni. Poradnik tribologii i tribotechniki (2), s. 5÷6.
123. Wolf H. 1969. Analyse des Istprofils hinsichtlich der Verteilung der Riefen und Rillenamplituden zum Erkennen der einzelnen Bestandteile des Istprofils am Profilschnitt. VDI-Bericht Nr 133, s. 325÷331. Düsseldorf. Niemcy.
124. Zeliaś A. 2000. Metody statystyczne. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne. Warszawa.
125. Żółtowski B. 1996. Podstawy diagnostyki maszyn. Wydawnictwo Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz.
126. Żółtowski B., Cempel Cz. (redakcja) 2004. Inżynieria diagnostyki maszyn. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom.
127. Żurowski W., Sadowski J. 2001. Badania maksymalnej odporności układów ciał metalicznych na zużywanie. Cz. II. Badania eksperymentalne maksymalnej odporności na zużywanie tribologiczne i wybranych cech warstwy wierzchniej. [W:] Inżynieria Powierzchni nr 1, s. 41÷55.