Janusz Musiał

ZNACZENIE TOPOGRAFII POWIERZCHNI W TRANSFORMACJI WARSTWY WIERZCHNIEJ WALCOWYCH PAR TOCZNYCH

WU BYDGOSZCZ

Janusz Musiał

ZNACZENIE TOPOGRAFII POWIERZCHNI W TRANSFORMACJI WARSTWY WIERZCHNIEJ WALCOWYCH PAR TOCZNYCH

Wydawnictwa Uczelniane
Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
w Bydgoszczy

OPINIODAWCA
Prof. dr hab. inż. Volodymyr Ljubymov

REDAKTOR DZIAŁOWY
dr hab. inż. Tomasz Piątkowski, prof. nadzw. UTP

Opracowanie redakcyjne i techniczne
mgr Michał Górecki, mgr inż. Tomasz Szałajda

Projekt okładki
mgr inż. Daniel Morzyński

© Copyright
Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
Bydgoszcz 2014

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany
ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych,
kopiujących, nagrywających i innych bez pisemnej zgody
posiadacza praw autorskich

ISBN 978-83-64235-36-8

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
Redaktor Naczelny
prof. dr hab. inż. Józef Flizikowski
ul. ks. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz, tel. 52 3749482, 52 3749426
e-mail: wydawucz@utp.edu.pl http://www.wu.utp.edu.pl

Wyd. I. Nakład 80 egz. Ark. aut. 6,3. Ark. druk. 7,25.
Zakład Małej Poligrafii UTP Bydgoszcz, ul. ks. A. Kordeckiego 20

SPIS TREŚCI

Spis ważniejszych oznaczeń i skrótów 5

1. WSTĘP 7
   1.1. Wprowadzenie 7
   1.2. Uzasadnienie problematyki badawczej 8

2. ANALIZA STANU WIEDZY Z ZAKRESU TEMATYKI PRACY – STUDIUM LITERATUROWE 11
   2.1. Transformacja warstwy wierzchniej 11
   2.2. Wpływ czynników technologicznych na cechy warstwy wierzchniej 16
      2.2.1. Zależność struktury geometrycznej powierzchni od parametrów obróbki 17
      2.2.2. Wpływ parametrów technologicznych na naprężenia powstające w warstwie wierzchniej 23
      2.2.3. Relacje między twardością i mikrotwardością powierzchni a czynnikami procesu wytwarzania 28
      2.2.4. Ciecze chłodząco-smarujące w procesie obróbki skrawaniem 29
   2.3. Eksploatacyjna warstwa wierzchnia 31
      2.3.1. Zjawiska tribologiczne zachodzące w parach kinematycznych ze stykiem skoncentrowanym 32
      2.3.2. Czynniki determinujące zmiany w warstwie wierzchniej podczas jej eksploatacji 33
      2.3.3. Cechy użytkowe tocznych par kinematycznych 39

3. PODSUMOWANIE ANALIZY LITERATURY 48
   3.1. Wnioski z przeglądu literatury 48
   3.2. Cel, teza i zakres pracy 48

4. BADANIA WŁASNE 50
   4.1. Etapy transformacji warstwy wierzchniej 50
   4.2. Obiekt badań 55
   4.3. Warunki badań technologicznych 56
   4.4. Warunki badań eksploatacyjnych 57
   4.5. Aparatura badawcza 59
   4.6. Kształtowanie technologicznej warstwy wierzchniej 60
      4.6.1. Program i zakres badań wstępnych 61
      4.6.2. Wyniki badań wstępnych i ich analiza 61
      4.6.3. Podsumowanie i wnioski z badań wstępnych 65
      4.6.4. Badania zasadnicze 67
         4.6.4.1. Topografia powierzchni technologicznej warstwy wierzchniej 67
         4.6.4.2. Udział materiałowy topografii powierzchni 78

4.6.5. Badania pomocnicze – wpływ parametru obróbki na mikrotwardość warstwy wierzchniej ... 80
4.6.6. Wnioski z badań technologicznych ... 81
4.7. Badania eksploatacyjne par tocznych ... 81
4.7.1. Badania wstępne ... 82
4.7.2. Badania zasadnicze ... 82
4.7.2.1. Wpływ wybranych czynników na moment tarcia ... 82
4.7.2.2. Wpływ topografii na zużycie liniowe ... 85
4.7.2.3. Zmiana topografii powierzchni w okresie docierania elementów tocznych ... 90
4.7.3. Wnioski z badań eksploatacyjnych ... 96
4.8. Podsumowanie badań własnych – charakterystyki technologiczno-eksploatacyjne ... 97
5. WNIOSKI KOŃCOWE ... 99
5.1. Wnioski poznawcze ... 99
5.2. Wnioski utylitarne ... 100
5.3. Podsumowanie pracy, propozycje dalszych badań ... 100
LITERATURA ... 102
STRESZCZENIA ... 114

Spis ważniejszych oznaczeń i skrótów

a_p – głębokość skrawania
b_i – współczynnik regresji
f – częstotliwość
f_o – posuw w mm·obr.$^{-1}$
F_{obl} – współczynnik istotności i adekwatności
L_n – trwałość zmęczeniowa
M_t – moment tarcia
p – naciski powierzchniowe
p-value – poziom istotności
R – współczynnik korelacji
R^2 – współczynnik determinowości
R_a – średnia arytmetyczna odchylenie profilu od linii średniej
R_{aT} – średnia arytmetyczna odchylenie profilu od linii średniej technologicznej warstwy wierzchniej
r_e – promień ostrza narzędzia
r_{XY} – współczynnik korelacji liniowej Pearsona
R_z – średnia wysokość profilu
R_{zT} – średnia wysokość profilu technologicznej warstwy wierzchniej
s – błąd standardowy
S_a – średnie arytmetyczne odchylenie od płaszczyzny średniej
S_{al} – długość odcinka najszybszego zanikania funkcji autokorelacji
S_{dq} – średnie kwadratowe pochylenie nierówności
S_{dr} – rozwinięcie powierzchni
S_k – wysokość chropowatości rdzenia
S_{ku} – współczynnik nachylenia powierzchni (skupienia)
S_{mc} – udział materiałowy powierzchni
S_{mr} – względny udział materiałowy
S_{mr1} – udział nośny wierzchołków
S_{mr2} – udział nośny wgłębień
S_p – wysokość najwyższego wzniesienia powierzchni
S_{pk} – zredukowana wysokość wzniesień
S_q – średnie kwadratowe odchylenie rzędnych powierzchni
S_{qT} – średnie kwadratowe odchylenie rzędnych powierzchni technologicznej warstwy wierzchniej
S_{sk} – współczynnik asymetrii powierzchni (skośności)
S_{tr} – wysokość tekstury powierzchni
S_v – głębokość najniższego wgłębienia powierzchni
S_{vk} – zredukowana wysokość wgłębień
S_z – wysokość nierówności wg 10 punktów

T	–	temperatura
t-Stat	–	współczynnik testu t-Studenta
v	–	prędkość skrawania
v_c	–	prędkość szlifowania
v_w	–	prędkość obwodowa przedmiotu szlifowanego
Z_l	–	zużycie liniowe
σ	–	naprężenia własne
σ_ψ	–	amplituda nacisków
μ	–	współczynnik tarcia tocznego
τ	–	czas

Skróty

DCK	–	dynamiczna cecha konstrukcyjna
EWW	–	eksploatacyjna warstwa wierzchnia
EWW_{we}	–	cechy wejściowe eksploatacyjne warstwy wierzchniej
GCK	–	geometryczna cecha konstrukcyjna
MQL	–	minimalne chłodzenie
MS	–	środek smarowy
SGP	–	struktura geometryczna powierzchni
TCK	–	tworzywowa cecha konstrukcyjna
TS	–	tarcie ślizgowe
TT	–	tarcia toczne
TWW	–	technologiczna warstwa wierzchnia
TWW_{wy}	–	cechy wyjściowe technologicznej warstwy wierzchniej
WW	–	warstwa wierzchnia

1. WSTĘP

1.1. WPROWADZENIE

Badania tribologiczne w ostatnich latach w głównej mierze dotyczą [68]:

- modelowania i symulacji procesów tribologicznych,
- projektowania materiałów o oczekiwanych właściwościach użytkowych,
- rozwoju metod inżynierii powierzchni,
- badań i opracowania metod prognozowania zużycia węzła tribologicznego,
- badań procesów zachodzących podczas współpracy elementów ze środkiem smarującym,
- zagadnień biotribologii.

Literatura związana tematycznie z badaniami zawiera dosyć liczne informacje dotyczące relacji jakościowych między parametrami różnych rodzajów obróbek wykończających a ich skutkami, których miarami są parametry opisujące stan warstwy wierzchniej (WW), np. [80, 141, 168, 182, 196]. Pomimo obserwowanego szybkiego rozwoju technik pomiarowych, zarówno w sferze sprzętu [80, 145, 166], jak i metodyki [32, 80, 94, 124], wciąż niezadowalająca jest liczba pozycji literaturowych, w których omawia się relacje ilościowe (modele, równania) między warunkami obróbki wykończającej a wielkościami opisującymi strukturę geometryczną powierzchni (strefy, która w bardzo istotnym stopniu wpływa na cechy użytkowe ruchowych par kinematycznych) uzyskanych w wyniku takiej obróbki [2, 85].

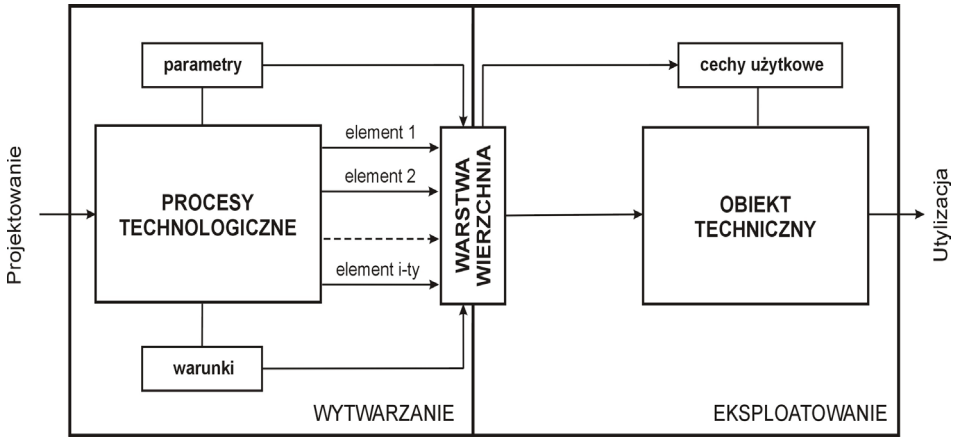
Publikacje, w których opisano badania prowadzące do wyznaczenia relacji między parametrami struktury geometrycznej powierzchni (SGP) a cechami użytkowymi tocznych par kinematycznych w okresie docierania, są nieliczne. Najczęściej jako miary cech użytkowych przyjmuje się w nich trwałość i opory ruchu, zmieniające się w rezultacie przemian SGP [100, 163, 183, 185, 193]. Gdyby warunki i parametry prezentowanych badań były takie same, ich rezultaty umożliwiałyby pośrednie wyznaczenie relacji między parametrami obróbki a cechami użytkowymi badanych skojarzeń [19, 165, 182]. Warunki badań nie są jednakowe, a na dodatek w wielu przypadkach niezbyt dokładnie opisane, zatem takich możliwości nie ma.

Obiektem badań tribologicznych jest warstwa wierzchnia będąca elementem łączącym fazy istnienia wytworu. W celu uzyskania produktu finalnego w procesie wytwarzania realizowane są różne procesy technologiczne. Są one prowadzone w zdefiniowanych warunkach i przy ściśle określonych parametrach. W ten sposób uzyskuje się elementy, które tworzą strukturę obiektu technicznego (maszyny). Cechy warstwy wierzchniej elementów zależą od rodzaju procesu technologicznego, a dla konkretnego procesu – od warunków i parametrów, przy jakich go realizowano.

Każdy obiekt techniczny charakteryzuje się zbiorem cech użytkowych. Elementy tworzące ten zbiór są zróżnicowane i zależą od rodzaju obiektu tech-

nicznego. Dla maszyn technologicznych cechy użytkowe to np.: dokładność realizowanego procesu, jego wydajność, zakresy parametrów, przy których może być realizowany proces technologiczny, maksymalne wymiary obrabianych przedmiotów itd. Większość z nich zdeterminowana jest cechami eksploatacyjnymi par kinematycznych tworzących strukturę maszyny, a te z kolei są funkcją cech warstwy wierzchniej elementów par kinematycznych – szczególnie zaś parametrów struktury geometrycznej powierzchni.

Wzajemne relacje między czynnikami występującymi w fazach istnienia wytworu przedstawiono na rysunku 1.1.



Rys. 1.1. Fazy istnienia wytworu oraz ich wzajemne relacje podczas procesów: wytwarzania i eksploatowania

Z jednej strony cechy warstwy są funkcją cech materiałowych, warunków i parametrów procesu technologicznego ustalonych w fazie projektowania, a zrealizowanych w fazie wytwarzania, z drugiej zaś – determinują cechy użytkowe wytworu i warunki, jakimi charakteryzuje się w fazie eksploatowania, oddziałując także na fazę utylizacji.

Informacji o badaniach dotyczących relacji między warunkami i parametrami procesu technologicznego a cechami eksploatacyjnymi produktu finalnego jest mało, a te, które opisano w literaturze są przyczynkowe i nie pozwalają na uogólnienia i praktyczne aplikacje. W zależności od rodzaju procesów zachodzących w parach kinematycznych, relacje te będą miały różny charakter, inne będą dla tarcia ślizgowego (TS), a inne dla tarcia tocznego (TT).

1.2. UZASADNIENIE PROBLEMATYKI BADAWCZEJ

Przeprowadzone powyżej rozważania wykazały, że analizy dotyczące procesów z przewagą tarcia tocznego wymagają dodatkowych badań.

Główny element badań – warstwa wierzchnia elementów maszyn – determinuje jakość tworzonych przez nie par kinematycznych (wydajność, nieza-

wodność, dokładność, sprawność itp.), a stan WW współpracujących elementów w decydujący sposób wpływa na proces ich zużywania – głównie intensywność. Jeden ze zbiorów wielkości opisujących stan WW tworzą parametry struktury geometrycznej jej powierzchni (SGP). Cechy warstwy wierzchniej, w tym jej SGP, zależą od zastosowanego procesu obróbki, głównie wykończającej, natomiast uzyskane w wyniku tej obróbki parametry (chropowatość, kierunkowość, falistość) determinują proces zużywania współpracujących elementów par kinematycznych. Rejestrując więc zmiany zachodzące w SGP utworzonej w zdefiniowanych warunkach i przy określonych parametrach obróbki, można wyznaczyć relacje między czynnikami technologicznymi a eksploatacyjnymi. Po to, aby móc sterować cechami użytkowymi, niezbędna jest zatem znajomość zależności technologiczno-eksploatacyjnych warstw wierzchnich współpracujących elementów, a tym samych całych par kinematycznych.

Tematyka związana z łożyskami tocznymi stanowi zagadnienie o dużym znaczeniu technicznym i ekonomicznym. Ciągłe unowocześnienia wprowadzane w produkcji łożysk tocznych wymusiły opracowanie rozbudowanych metod badań, mających na celu identyfikację przyczyn powstawania uszkodzeń. Jednym z celów tych działań jest analiza zjawisk zachodzących podczas docierania tocznych par kinematycznych. W przypadku walcowych łożysk tocznych można za Waligórą [187] wymienić cztery główne metody ich badań. Należą do nich:

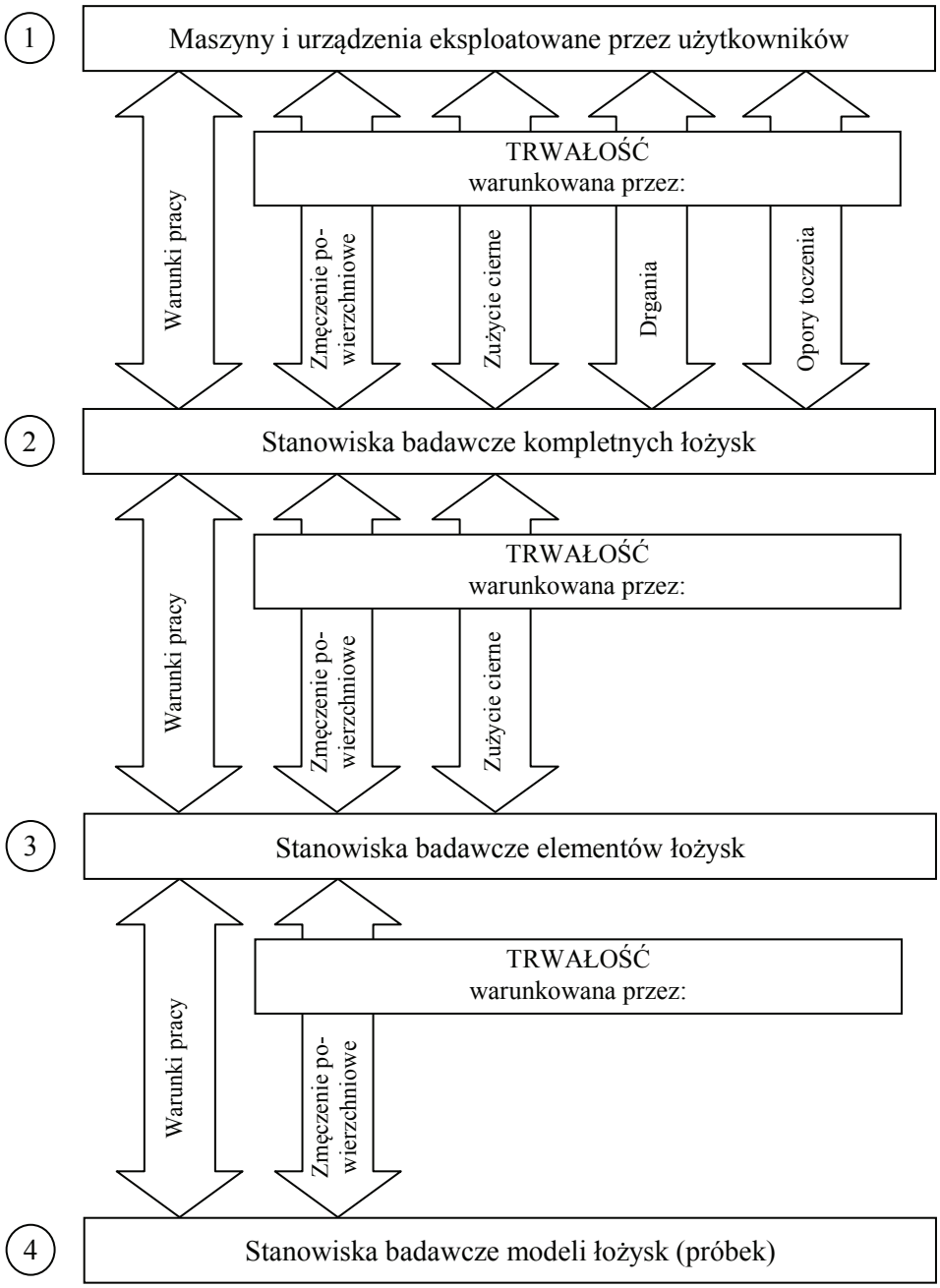
- badania zachowania się łożysk w maszynach i urządzeniach eksploatowanych przez użytkowników,
- badania kompletnych łożysk,
- badania elementów składowych tych łożysk,
- badania laboratoryjne próbek, będących modelami łożysk tocznych.

Podczas badań tribologicznych na modelach łożysk tocznych metodę badawczą można uznać za poprawną, jeżeli wyniki nie przeczą wnioskom wynikającym z uznanych za słuszne modeli interpretacyjnych. Warunki pracy obserwowanego obiektu ustalić należy tak, aby można było porównywać uzyskiwane wyniki badań [84]. Tworzy się wówczas swoisty system badawczy, w którym występują elementy badań oraz relacje między nimi (rys. 1.2) [187].

Eksploatacyjne badania łożysk tocznych dotyczące trwałości, czyli określenia zmian w ostatnim okresie ich pracy, wiążą się w większości przypadków z bardzo długim czasem trwania badań. Wyniki tych badań prezentowane są w literaturze tematu. Ich interpretacja jest stosunkowo trudna ze względu na fakt, iż zawierają one nie tylko informacje o jakości samych łożysk tocznych, lecz również maszyn, w których te łożyska występują.

Obszarem niezbadanym jest początkowy okres pracy łożysk, gdzie następuje docieranie powierzchni współpracujących.

W literaturze można spotkać analizy dotyczące początkowego okresu współpracy skojarzeń z przewagą tarcia ślizgowego, dlatego też należy podjąć badania zmierzające do wyznaczenia wspomnianych wyżej relacji dotyczących zjawisk z przewagą tarcia tocznego.



Rys. 1.2. Klasyfikacja metod badania powierzchniowej trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych, ich elementów i modeli łożysk [187]

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

2.1. TRANSFORMACJA WARSTWY WIERZCHNIEJ

Zwiększone zainteresowanie warstwą wierzchnią elementów maszyn obserwuje się od początku XX wieku, wówczas intuicyjnie uznawano, że odgrywa istotną rolę w zakresie kształtowania cech użytkowych elementów. W tym okresie uważano, że jedyną wymierną cechą warstwy wierzchniej jest jej chropowatość uzyskana jako rezultat obróbki.

Zainteresowanie to przyczyniło się do pewnego uściślenia pojęć: zdefiniowania samej warstwy wierzchniej, identyfikacji jej cech charakterystycznych, zaproponowania wielkości, które opisują te cechy, a przede wszystkim do poznania jej budowy, tworzenia modeli systematyzujących prowadzone badania, co z kolei umożliwia porównanie ich wyników. Sformułowane definicje różnią się między sobą, lecz istota warstwy wierzchniej pozostaje w nich taka sama lub jest bardzo zbliżona. Potwierdzeniem tego spostrzeżenia mogą być przytoczone poniżej definicje.

Według Polskich Norm (PN-87/M-04250: Warstwa wierzchnia. (Terminologia) warstwa wierzchnia jest to zewnętrzna warstwa materiału ograniczona rzeczywistą powierzchnią przedmiotu (powierzchnia oddzielająca przedmiot od otaczającego ośrodka), obejmująca tę powierzchnię oraz część materiału w głąb od powierzchni, która wykazuje zmienione cechy fizyczne i niekiedy chemiczne w stosunku do cech materiału rdzenia.

Warstwa wierzchnia materiału, według autora pracy [22], rozumiana jest jako zbiór punktów materialnych zawartych między jego powierzchnią zewnętrzną a powierzchnią umowną, będącą granicą zmian wartości cech strefy podpowierzchniowej, powstałej w wyniku wymuszeń zewnętrznych. Pozostała część materiału przedmiotu poza warstwą wierzchnią – to rdzeń.

Stan warstwy wierzchniej obejmuje zbiór własności, które można opisać parametrami: fizykochemicznymi, stereometryczno-fizykochemicznymi, a przede wszystkim stereometrycznymi [22].

Na podstawie przeglądu literatury stwierdzono, że do parametrów fizykochemicznych dotyczących materiału warstwy wierzchniej najczęściej zalicza się poniższe parametry [17, 22, 48, 107]:

- strukturalne materiału (budowa),
- mechaniczne (np. mikrotwardość, naprężenia własne),
- chemiczne (np. skład chemiczny, adsorpcja),
- cieplne (np. rozpuszczalność, przewodność),
- fizyczne (np. adhezja),
- elektryczne (np. konduktywność, rezystancja),
- magnetyczne (np. przenikalność, koercja).

Parametry stereometryczno-fizykochemiczne dotyczą zarówno powierzchni rzeczywistej, jak i materiału warstwy wierzchniej (np. energii powierzchniowej, napięcia powierzchniowego).

Parametrami decydującymi o własnościach i właściwościach warstwy wierzchniej, wpływającymi zarazem pośrednio na pozostałe, wcześniej przedstawione grupy, są parametry opisujące strukturę geometryczną powierzchni. Strukturę tę tworzą nierówności powierzchni, które można opisać na podstawie profilu (w układzie 2D) lub topografii (w układzie 3D). Strukturę geometryczną powierzchni można scharakteryzować posługując się tzw. Listą Birmingham, określającą 14 parametrów topografii [169]. Zbiór tych parametrów jest zestawem ograniczonym, biorąc pod uwagę szybko wzrastającą liczbę możliwych pomiarów. Zestaw ten został rozszerzony do 24 parametrów (projekt Surfstand) [13]. W skład wchodzi 15 parametrów z grupy *S*:

parametry amplitudowe:

S_q – średnie kwadratowe odchylenie rzędnych powierzchni, μm,
S_p – wysokość najwyższego wzniesienia powierzchni, μm,
S_v – głębokość najniższego wgłębienia powierzchni, μm,
S_{sk} – współczynnik asymetrii powierzchni (skośności),
S_{ku} – współczynnik nachylenia powierzchni (skupienia),
S_z – wysokość nierówności, μm,
S_{5z} – wysokość piątego wzniesienia nierówności, μm,

parametry hybrydowe:

S_{dq} – średnie kwadratowe pochylenie nierówności,
S_{dr} – rozwinięcie powierzchni,
S_{sc} – średnia arytmetyczna krzywizna wierzchołków nierówności, 1/μm,

parametry przestrzenne:

S_{al} – długość odcinka najszybszego zanikania funkcji autokorelacji, μm,
S_{tr} – wysokość tekstury powierzchni,
S_{ds} – gęstość wierzchołków, liczba wierzchołków na mm,
S_{td} – kierunek tekstury powierzchni,
S_{fd} – wymiar fraktalny,

i 9 parametrów z grupy V (oparte na krzywej Abbotta-Firstone'a), do których zalicza się:

S_k – wysokość chropowatości rdzenia, μm,
S_{pk} – zredukowana wysokość wzniesień μm,
S_{vk} – zredukowana wysokość wgłębień, μm,
S_{mr1} – udział nośny wierzchołków, %,
S_{mr2} – udział nośny wgłębień, %,
V_{vc} – objętość pustek rdzenia powierzchni,
V_{vv} – objętość pustek dolin powierzchni,

V_{mp} – objętość materiału części wierzchołkowej powierzchni,
V_{mc} – objętość materiału rdzenia powierzchni.

Ogólnie parametry w układzie 3D można podzielić na dwie grupy: pierwsza nazywana polowymi (ang. *field*) – stosowana do monitorowania obróbki, druga określona cechowymi (ang. *feature*), które wykorzystywane są w celach diagnostycznych [13, 60, 131, 192].

W badaniach tribologicznych rozróżnia się głównie dwa rodzaje warstw wierzchnich: technologiczną i eksploatacyjną.

Technologiczna warstwa wierzchnia (TWW) pojmowana jest jako warstwa wierzchnia ukonstytuowana w wyniku celowych działań realizowanych podczas procesów technologicznych. Określa więc stan elementu podczas jego wytwarzania, aż do zakończenia tego procesu. Po raz pierwszy użyto do określenia tego stanu nazwy „technologiczna warstwa wierzchnia" w 1995 roku w pracy [22]. Od tego czasu jest ona powszechnie stosowana nie tylko w dziedzinie tribologii.

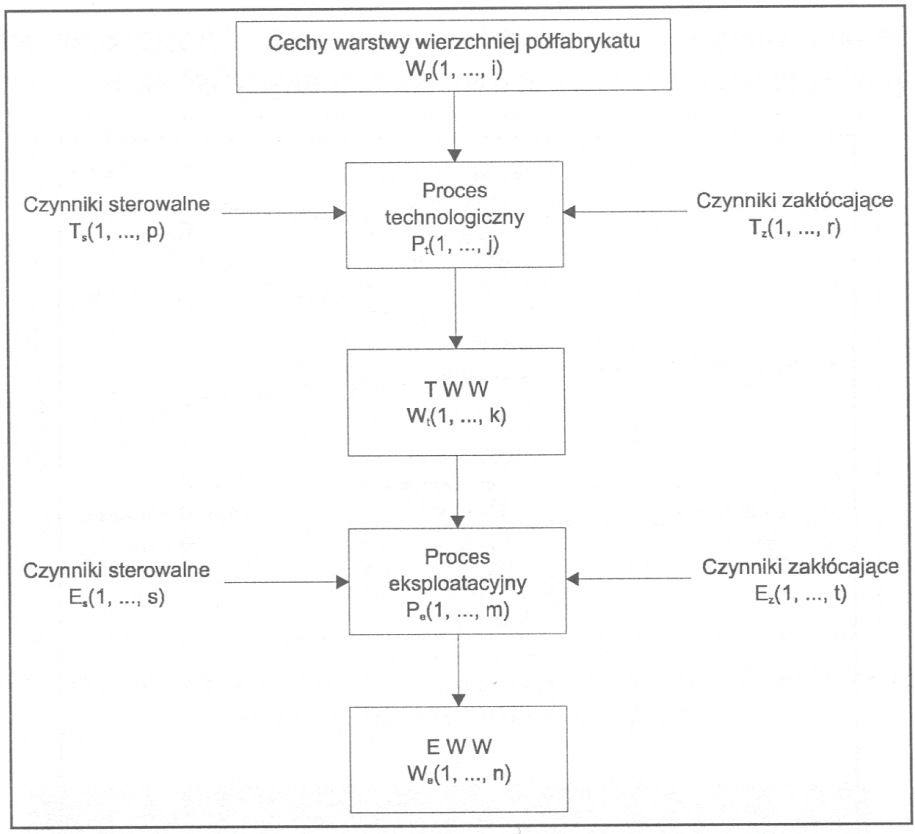
Pod pojęciem eksploatacyjnej warstwy wierzchniej (EWW) rozumie się stan warstwy wierzchniej po rozpoczęciu procesu eksploatowania elementów maszyn [21].

Zmiany warstwy wierzchniej rozumiane są jako transformacja technologicznej warstwy wierzchniej w eksploatacyjną pod wpływem wymuszeń zewnętrznych, przy udziale lub bez środka smarnego MS [20, 21]. Schemat tak rozumianej przemiany przedstawiono na rysunku 2.1.

$$\mathbf{TWW} \xrightarrow[MS\ (dodatki)]{wymuszenia\ (p,v,T)} \mathbf{EWW}$$

Rys. 2.1. Przebieg transformacji [20]

W pracach [10, 64, 65] przedstawiono proces zmian warstwy wierzchniej ukształtowanej w procesie technologicznym, która podlega dalszym stereometrycznym i fizycznym zmianom w procesie eksploatacji, pod wpływem czynników sterowalnych i niesterowalnych – rysunek 2.2.



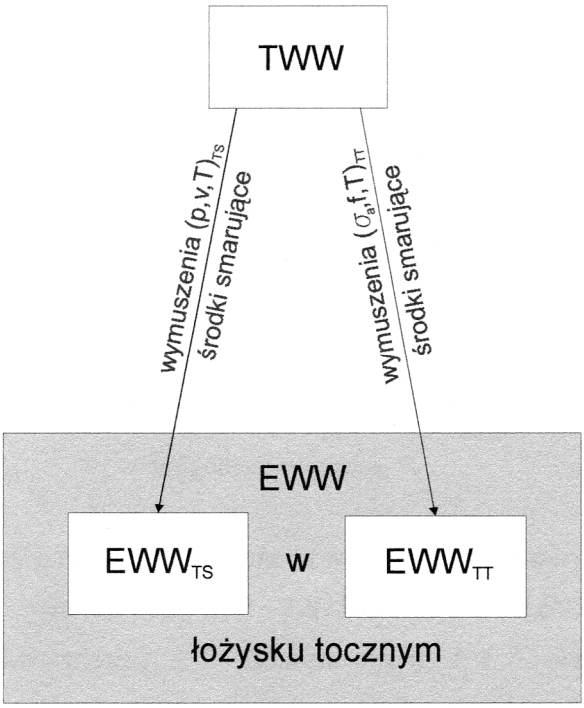
Rys. 2.2. Algorytm kształtowania warstwy wierzchniej [65]

W zależności od rodzaju zachodzących w parze kinematycznej procesów mechanizm transformacji będzie różny, np. inny będzie dla styku skoncentrowanego, inny dla styku rozłożonego.

W przypadku pary kinematycznej z tarciem tocznym (styk skoncentrowany) o intensywności zużywania decydować będzie proces zużywania zmęczeniowego. Uwzględniając istotę tego procesu jako wymuszenia determinujące transformację, proponuje się przyjąć [174]:

- amplitudę nacisków,
- częstotliwość zmian,
- obecność czynnika smarującego.

Graficzną postać transformacji warstwy wierzchniej takich par (łożysk tocznych) przedstawiono na rysunku 2.3. W wyniku zmian powstała eksploatacyjna warstwa wierzchnia, będąca skutkiem tarcia ślizgowego i tarcia tocznego.



Rys. 2.3. Schemat transformacji warstwy wierzchniej w łożysku tocznym [170]

W parze kinematycznej z tarciem ślizgowym dominującym procesem zużywania jej elementów jest zjawisko zacierania [73, 123]. Na podstawie analizy mechanizmu tego procesu przyjmuje się, że na przebieg transformacji w węźle z tarciem ślizgowym (styk rozłożony) istotny wpływ mają następujące wymuszenia eksploatacyjne [107]:

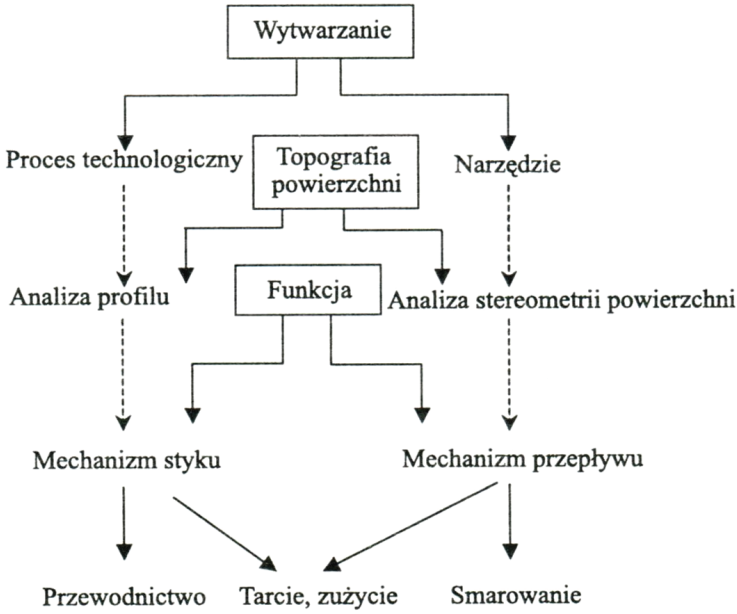
- naciski jednostkowe,
- prędkość,
- temperatura,
- czynnik smarujący (obecność, rodzaj i ilość).

Zarówno dla tarcia ślizgowego, jak również w przypadku tarcia tocznego zakłada się, że transformacja zachodzi w obecności środków smarowych, które mają wpływ na mechanizm transformacji. W styku konforemnym decydują o rodzaju tarcia i tworzeniu się warstwy granicznej, natomiast w skojarzeniu niekonforemnym, np. w parach tocznych, mogą stanowić czynnik rozklinowujący mikropęknięcia powstające w WW. Powierzchniowo aktywne składniki środków smarowych mogą także zmieniać intensywność procesu zużywania, czego przykładem może być tzw. efekt Rebindera.

Powyższe sformułowania i liczne badania np. [21, 65, 73, 101] wykazały, że warstwa wierzchnia elementów maszyn w decydujący sposób determinuje cechy funkcjonalne całej maszyny. Stwierdzono także, że od cech WW powsta-

łej w wyniku realizacji założonego procesu technologicznego zależy proces zużywania – jego mechanizm, intensywność i skutki, zależy więc też trwałość maszyny.

Na rysunku 2.4 przedstawiono zależność pomiędzy wytwarzaniem, powierzchnią a właściwościami użytkowymi [191]. Strukturę geometryczną powierzchni ocenia się na podstawie profilu lub topografii powierzchni (stereometrii powierzchni). Na topografię powierzchni główny wpływ mają parametry technologiczne i cechy narzędzia. Schemat ten przedstawia najważniejsze zależności, nie wyczerpując całości zagadnienia.



Rys. 2.4. Zależności między wytwarzaniem, powierzchnią a właściwościami użytkowymi [191]

Transformacja, a w szczególności okres przejścia technologicznej w eksploatacyjną WW, stanowi bardzo istotne zagadnienie, mające wpływ na zwiększenia efektywności i funkcjonalności par tribologicznych.

2.2. WPŁYW CZYNNIKÓW TECHNOLOGICZNYCH NA CECHY WARSTWY WIERZCHNIEJ

Pojęcie technologicznej warstwy wierzchniej istnieje w technikach wytwarzania w zasadzie od chwili pojawienia się tribologii jako integralnej dziedziny nauki zajmującej się zagadnieniami tarcia, zużywania i smarowania.

Określenie technologicznej WW dotyczy ukształtowanej w procesie wytwarzania warstwy wierzchniej wraz z jej cechami charakterystycznymi. Po

każdym etapie wytwarzania uzyskuje się inne (jakościowo i/lub ilościowo) właściwości, zależne od materiału oraz od technologii wytwarzania. Ważnym aspektem jest również kolejność stosowanych operacji w celu uzyskania oczekiwanych cech użytkowych.

Coraz częściej w technikach wytwarzania wprowadza się komponowanie technologii wytwarzania [18]. Jest to świadome łączenie technik wytwarzania, dobieranie rodzaju i kolejności ich stosowania w procesie technologicznym. Z szerokiej gamy technologii wytwarzania powinny być dobierane operacje najbardziej właściwe dla przyszłego zastosowania warstwy wierzchniej.

Na etapie projektowania należy brać pod uwagę zastosowania eksploatacyjne elementu. Zastosowanie to powinno być uwzględniane przy planowaniu wszystkich kolejnych operacji wytwarzania.

Ze względu na duże zróżnicowanie oczekiwanych cech oraz związaną z tym ogromną liczbę stosowanych w przemyśle procesów technologicznych oraz ich odmian, TWW jest obiektem zainteresowania wielu naukowców, czego przejawem jest cały szereg publikacji związanych bezpośrednio i pośrednio z tą tematyką. Ważniejsze wyniki badań zawarte w pracach zostały przedstawione w następnym rozdziale.

Zmiany zachodzące w technologicznej warstwie wierzchniej są zależne od rodzaju i parametrów obróbki oraz od materiału. Analizując prezentowane w literaturze [16, 17, 45, 63, 73, 134] metody kształtowania TWW, należy stwierdzić, że jest ona wynikiem oddziaływania – w poszczególnych operacjach procesu technologicznego – trzech podstawowych zbiorów czynników:

- mechanicznych,
- cieplnych,
- fizykochemicznych.

W wielu przypadkach podział ten jest niejednoznaczny, a poszczególne zbiory metod tradycyjnych zachodzą na siebie (komponowanie technologii). Często stosuje się obróbki hybrydowe, wspomagając i intensyfikując w ten sposób procesy zasadnicze [8, 40, 41, 50, 106, 121, 144].

Do głównych determinantów zmian zachodzących w technologicznej warstwie wierzchniej zalicza się: tworzywo konstrukcyjne oraz rodzaj i parametry obróbki. Do czynników wyjściowych zaś cechy struktury geometrycznej powierzchni, twardość i mikrotwardość oraz naprężenia własne.

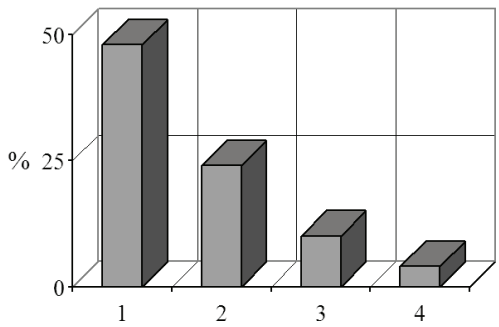
2.2.1. Zależność struktury geometrycznej powierzchni od parametrów obróbki

Analizując podstawowe charakterystyki warstwy wierzchniej, nie sposób nie zauważyć, że dużą jej część zajmuje jedna z geometrycznych cech konstrukcyjnych – struktura geometryczna powierzchni.

Struktura geometryczna powierzchni narażona jest na szereg zakłóceń, których przyczyny mogą mieć następujący charakter [132]:

– tribologiczny – powstają w ruchomym styku powierzchni obrabianej z powierzchnią narzędzia,
– geometryczny – odzwierciedlający odchyłki geometrii narzędzia obróbkowego,
– dynamiczny – głównie zależny od drgań,
– kinematyczny – powstałe w wyniku błędów łańcucha kinematycznego układu obróbkowego.

Udział zakłóceń w SGP kształtowanych w procesach obróbkowych przedstawiono na rysunku 2.5.



Rys. 2.5. Udział zakłóceń w strukturach geometrycznych powierzchni kształtowanych w procesach obróbkowych: 1 – tribologicznych, 2 – geometrycznych, 3 – dynamicznych, 4 – kinematycznych [132]

Do wyżej przedstawionych przyczyn Liubymov i Stachowicz zaproponowali jeszcze dwie o charakterze [91]:

– energetycznym – dotyczy przypadku dostarczenia do procesu kształtowania, nieodpowiedniej ilości energii,
– związanym z dziedzictwem technologicznym.

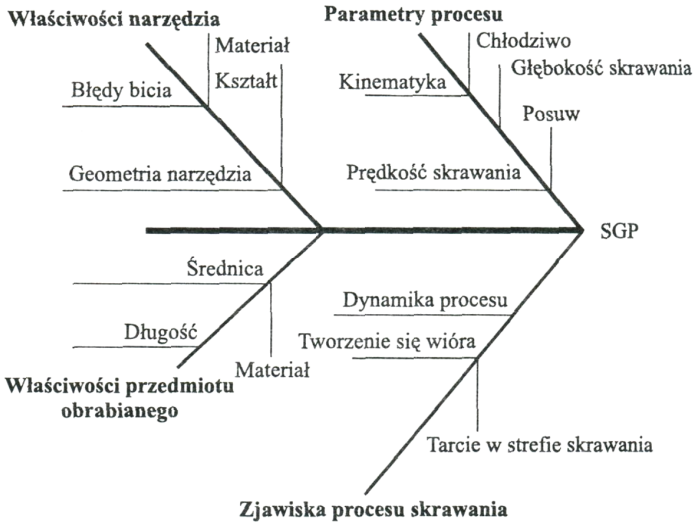
Utworzona w procesie wytwarzania powierzchnia rzeczywista jest zbiorem nierówności ukształtowanych w wyniku równoczesnego oddziaływania parametrów obróbczych z właściwością obrabianego materiału. Wysokość tych nierówności zależy od:

– parametrów skrawania,
– własności materiału obrabianego,
– warunków chłodzenia,
– geometrii i zużycia ostrza,
– drgań.

Przedstawione powyżej czynniki mają różny wpływ na zmiany parametrów chropowatości powierzchni.

Do czynników wpływających na chropowatość powierzchni w procesie technologicznym po obróbce skrawaniem, przedstawionych na rysunku 2.6, zalicza się [141]:

- właściwości narzędzia skrawającego i przedmiotu obrabianego,
- parametry i zjawiska procesu skrawania.



Rys. 2.6. Czynniki wpływające na strukturę geometryczną powierzchni po obróbce skrawaniem [141]

Na podstawie analizy literaturowej dotyczącej prognozowania powierzchni podczas jej wytwarzania obróbką wiórową można wyróżnić trzy obszary badawcze [141]:

- oparty na zależnościach wynikających z teorii obróbki,
- określenie doświadczalnego wpływu różnych czynników wejściowych,
- wykorzystanie metod sztucznej inteligencji.

W pierwszym obszarze badania oparto na kinematyce obróbki, mechanizmie powstawania wióra, właściwościach narzędzia [14, 44, 88, 90]. Cechy charakterystyczne obróbki, tj. dokładność kinematyczna i geometryczna zespołów obrabiarek czy płynność ruchu posuwowego, odwzorowują zmiany w strukturze geometrycznej powierzchni. Autorzy pracy [88] opracowali model zależności profili powierzchni od parametrów drgań podczas toczenia.

Drugi obszar badawczy zawiera wybór czynników wpływających na strukturę geometryczną powierzchni na podstawie przeprowadzonego eksperymentu [1, 29, 37, 46, 97, 146, 161].

Coraz większe znaczenie odgrywa możliwość sterowania parametrami struktury geometrycznej powierzchni poprzez określenie zależności matematycznych tych wartości od parametrów procesu wytwarzania. W niektórych

przypadkach np. w procesie toczenia z dużymi prędkościami i nożem o zadanym promieniu, parametr chropowatości oblicza się według następującej zależności [27, 35, 36, 136, 140]:

$$R_a = \frac{0{,}03125 \cdot f_o^2}{r_\varepsilon} \tag{2.1}$$

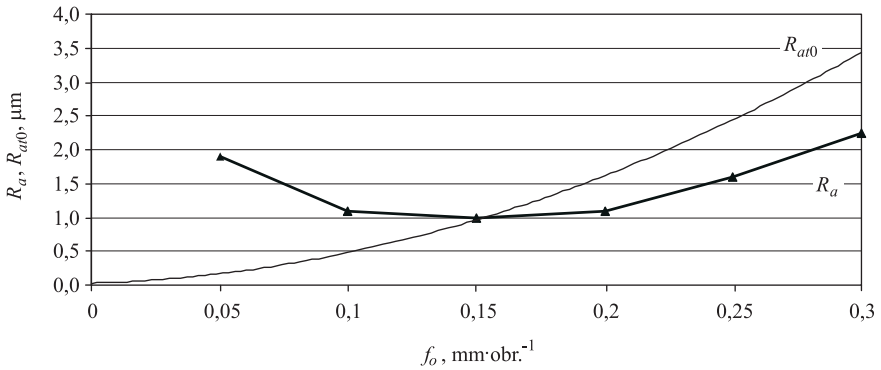
gdzie:

f_o – posuw, mm·obr.$^{-1}$,

r_ε – promień naroża ostrza, mm.

W pracy [179], dotyczącej procesu toczenia, zaprezentowano w niewielkim stopniu zmodyfikowaną zależność (2.1). Dodatkowo odniesiono wartości mierzone R_a do wartości obliczonych R_{at0} na podstawie wzoru (2.2). Postać graficzną tego porównania przedstawiono na rysunku 2.7.

$$R_{at_0} = \frac{0{,}0321 \cdot f_o^2}{r_\varepsilon} \tag{2.2}$$

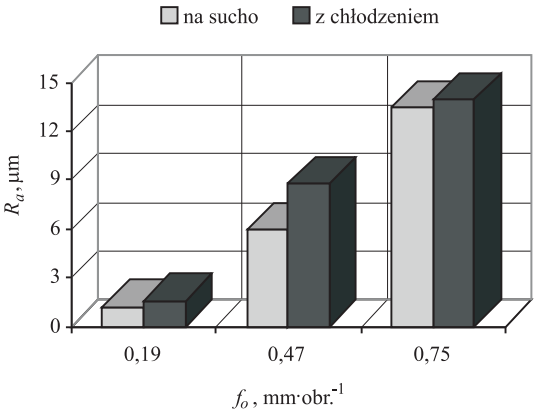


Rys. 2.7. Wpływ posuwu f_o na wartości teoretyczne R_{at0} i mierzone R_a mikronierówności powierzchni obrabianej toczeniem (materiał obrabiany – Inconel 718, narzędzie – płytka z węglika spiekanego IC3028, r_e = 0,8 mm, v = 62 m·min^{-1}) [179]

Na podstawie powyższych analiz można stwierdzić, że przydatność przedstawionych zależności jest niewielka i może stanowić uproszczony model matematyczny, pozwalający na sterowanie parametrem wyjściowym, jakim jest R_a za pomocą zmiany wartości parametrów wejściowych: posuwu f_o i promienia ostrza r_ε tylko w określonych warunkach obróbki.

W pracy [26] badano zależności pomiędzy parametrami skrawania: posuwem, głębokością i prędkością skrawania od chropowatości powierzchni toczonych, określoną parametrami wysokościowymi R_a i R_t. Wykazano, że największy wpływ na nierówności powierzchni ma prędkość skrawania.

Wiele prac [27, 35, 36, 69,140] dotyczących obróbki toczeniem wskazuje jako determinantę zmian wartości chropowatości – posuw. Graficzną zależność parametru R_a od posuwu dla toczenia na sucho i z chłodzeniem przedstawiono na rysunku 2.8.



Rys. 2.8. Zależność chropowatości powierzchni R_a od posuwu dla toczenia na sucho i z chłodzeniem (materiał obrabiany stal C45, pozostałe parametry v = 75 m·min^{-1}, płytka TNMM 160408 o r_ε = 0,8 mm) [78]

Wraz ze zwiększeniem wartości posuwu następuje wyraźny wzrost parametru chropowatości.

W literaturze dotyczącej analizowanego zagadnienia zależności chropowatości od parametrów wytwarzania głównie przedstawiane są w postaci wielomianów [51, 79, 83, 89, 151].

Wielomian pierwszego stopnia przedstawiono w pracy [51], a jego postać przedstawia zależność (2.3):

$$R_a = 3{,}1955 \cdot v + 4{,}2311 \cdot 10^{-5} \cdot f_o + 20703{,}7302 \cdot a_p - 4{,}2334 \cdot 10^{-5} \cdot v \cdot f_o - 20826{,}5222 \cdot v \cdot a_p - 6{,}0964 \cdot 10^{-5} \cdot f_o \cdot a_p \quad (2.3)$$

gdzie:

v – prędkość skrawania, m·min^{-1},

a_p – głębokość skrawania, mm.

Podstawowym wielomianem wykorzystywanym w tego typu badaniach jest wielomian drugiego stopnia.

Autorzy pracy [89] przedstawili wielomian drugiego stopnia (2.4) po wyeliminowaniu współczynników nieistotnych:

$$R_a = -2{,}172026 + 0{,}035321 \cdot v - 0{,}000103 \cdot v^2 + 86{,}164152 \cdot f_o^2 - 0{,}037214 \cdot v \cdot f_o + 3{,}856817 \cdot f_o \cdot a_p \quad (2.4)$$

Równania w postaci przedstawionej powyżej pozwalają tylko na weryfikację zależności w badanym przedziale zmiennych. Utrudnia to analizę zależności chropowatości od parametrów technologicznych poza badanym zakresem, gdzie dla wartości parametrów skrawania równych zero wartość chropowatości jest ujemna.

W dużo większym stopniu prognozowanie wartości parametrów chropowatości odzwierciedla funkcja potęgowa. Przykład takiej zależności przedstawiono poniżej [178]:

$$R_a = 28{,}14185 \cdot v^{-0{,}192844} \cdot {f_o}^{0{,}814111} \cdot {a_p}^{-0{,}117306} \cdot {r_\varepsilon}^{0{,}031946} \tag{2.5}$$

Poza podstawowymi parametrami obróbki, tj. prędkością skrawania, posuwem, głębokością skrawania czy promieniem ostrza, uwzględnia się również inne czynniki. W pracy [156] zaproponowano zależność matematyczną (2.6) wzbogaconą dodatkowo o długość drogi toczenia:

$$\begin{aligned} R_a = {} & 1{,}631510 - 0{,}005127 \cdot v_c - 1{,}007386 \cdot f_o - 16{,}241243 \cdot a_p + \\ & 0{,}000019 \cdot L + 0{,}000011 \cdot v_c^2 + 2{,}328053 \cdot {f_o}^2 + 49{,}446139 \cdot a_p^2 - \\ & 0{,}000000 \cdot L^2 + 0{,}007469 \cdot v_c \cdot f_o + 0{,}011817 \cdot v_c \cdot a_p + \\ & 0{,}000001 \cdot v_c \cdot L + 5{,}402884 \cdot f_o \cdot a_p - 0{,}000269 \cdot f_o \cdot L + \\ & 0{,}000229 \cdot a_{p.} \cdot L - 0{,}047273 \cdot v_c \cdot f_o \cdot a_p + 0{,}001066 \cdot f_o \cdot a_p \cdot L - \\ & 0{,}000004 \cdot v_c \cdot a_p \cdot L + 0{,}000005 \cdot v_c \cdot f_o \cdot a_p \cdot L \end{aligned} \tag{2.6}$$

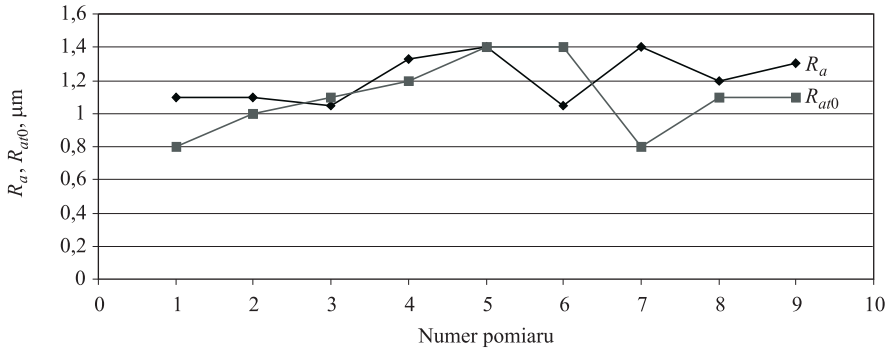
gdzie:

L – długość drogi toczenia, m.

Wykazano, że zmiana wartości parametru drogi toczenia w niewielkim stopniu wpłynęła na chropowatość powierzchni.

Trzeci z obszarów dotyczy zastosowania sztucznych sieci neuronowych (SSN), algorytmów genetycznych czy logiki rozmytej.

W technikach wytwarzania coraz częściej używa się sztucznych sieci neuronowych, za pomocą których można prognozować chropowatość. W pracach [5, 61, 89, 122, 162, 163, 197] przedstawiono wykorzystanie tych technik w procesie toczenia. Różnice, jakie powstają pomiędzy wartościami R_a uzyskanymi na podstawie badań doświadczalnych a wynikami otrzymanymi z zastosowania sieci neuronowych, przedstawiono na rysunku 2.9. Zaproponowany model, uwzględniający interakcje między poszczególnymi parametrami skrawania, zdaniem autorów opracowania osiąga dokładność na poziomie 75%.



Rys. 2.9. Porównanie rzeczywistych R_a i prognozowanych R_{a0} wartości nierówności (materiał obrabiany mosiądz C26000, pozostałe parametry f_o = 0,12 mm·obr.$^{-1}$, a_p = 0,2 mm, v = 210 m·min^{-1}, płytka CNMG 120408 o r_ε = 0,8 mm) [122]

Przeprowadzone w latach 1998-2004 badania wykazały, że prawie 100% przedsiębiorstw, badanych ze względu na sposób określania stanu SGP, korzysta z parametru R_a, znacznie mniej z parametrów R_z (~85%), R_t (~60%), R_p (~30%). Pozostałe parametry wykorzystuje mniej niż 10% firm [55].

Obserwuje się coraz większe zastosowanie w badaniach parametrów topografii. Większość parametrów 3D (stereometrycznych) jest rozwinięciem parametrów profilu nierówności. Porównanie tych dwóch typów pomiarów dokonano w pracach [13, 32, 133, 157]. Autorzy prac [34, 186] zawęzili wpływ parametrów do jednej obróbki – toczenia – na topografię powierzchni.

2.2.2. Wpływ parametrów technologicznych na naprężenia powstające w warstwie wierzchniej

Najistotniejszą z dynamicznych cech konstrukcyjnych determinujących cechy warstwy wierzchniej są jej naprężenia własne.

W wyniku zewnętrznych oddziaływań mechanicznych, chemicznych, cieplnych lub ich kombinacji w materiale zachodzą odkształcenia sprężyste (zmiany odwracalne) i odkształcenia plastyczne (zmiany nieodwracalne), powodując powstawanie naprężeń własnych. Są to naprężenia równoważące się wzajemnie, występujące po usunięciu obciążenia zewnętrznego.

Są one, jak wcześniej wskazano, funkcją obciążeń zewnętrznych, struktury wewnętrznej materiału, rodzaju obróbki oraz przemian fazowych wywołanych tą obróbką.

Naprężenia własne można przedstawić jako funkcję [11]:

$$\sigma = f(m,t,k,o) \tag{2.7}$$

gdzie:

m – właściwości materiału,

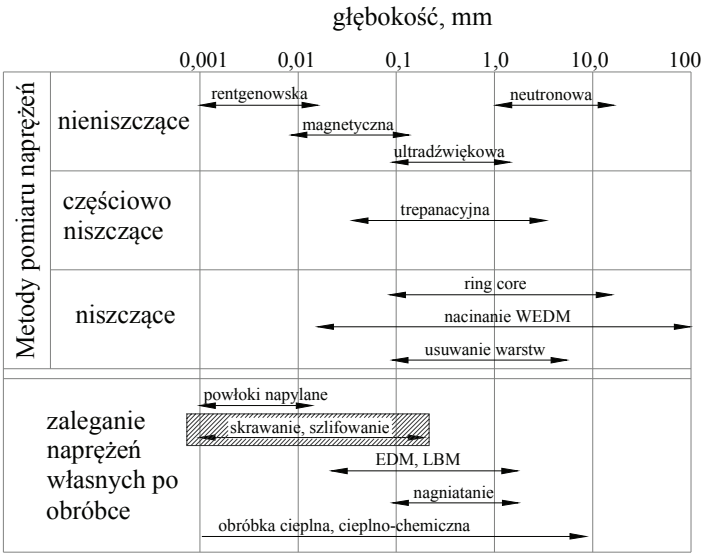
t – technologia wytwarzania warstwy wierzchniej,

k – kształt i wielkość pola pomiaru naprężeń własnych,
o – oddziaływania rdzenia na warstwę wierzchnią.

W zależności od zasięgu oddziaływania rozróżnia się trzy rodzaje naprężeń własnych [31, 143, 154]:

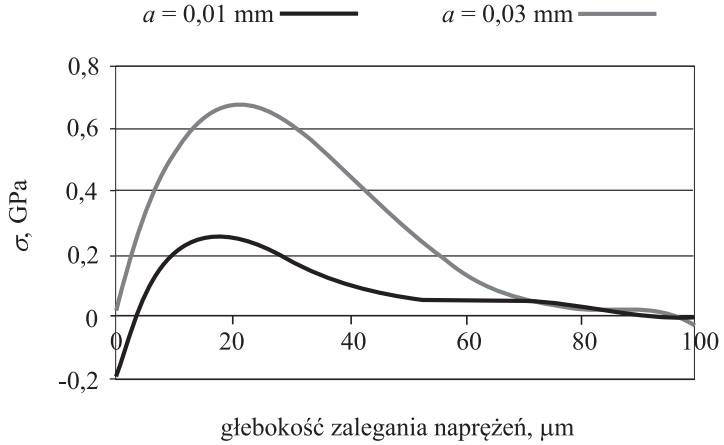
- I rodzaju – makronaprężenia – obejmują cały element. Wywołane są głównie obróbką oraz nierównomiernym stygnięciem warstwy wierzchniej na różnych głębokościach. Naprężenia tego rodzaju powodują zmiany gabarytów obrabianego przedmiotu oraz odkształcenia i pęknięcia w warstwie wierzchniej;
- II rodzaju – mikronaprężenia – występują w obrębie sąsiadujących ziaren. Wywołane są zmianą orientacji ziaren wobec siebie;
- III rodzaju – submikronaprężenia – występują w obrębie jednego ziarna i pochodzą od defektów sieci krystalicznej.

Zakres występowania naprężeń własnych w warstwie wierzchniej oraz stosowane metody ich pomiaru przedstawiono na rysunku 2.10 [6].



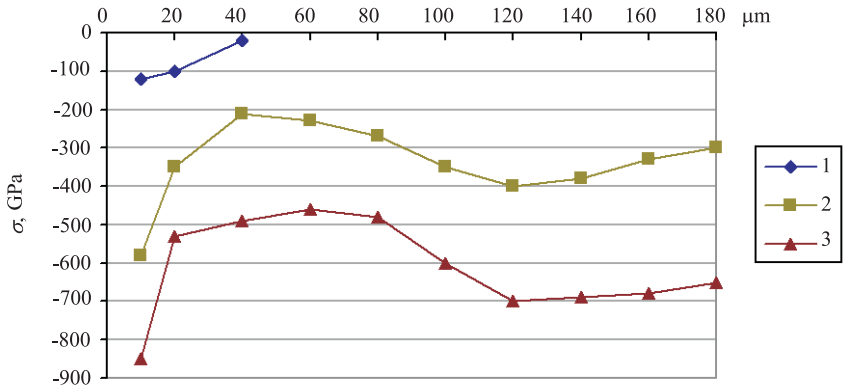
Rys. 2.10. Zakres występowania naprężeń własnych w warstwie wierzchniej oraz stosowane metody ich pomiaru [6]

Maksymalna głębokość zalegania naprężeń własnych po obróbce skrawaniem i szlifowaniem wynosi około 0,1 mm. Potwierdzeniem są graficzne zależności wartości naprężeń własnych od głębokości zalegania, powstałych w wyniku szlifowania (rys. 2.11).



Rys. 2.11. Zależność wartości naprężeń własnych od głębokości zalegania naprężeń w procesie szlifowania (materiał obrabiany – stal NC6, narzędzie – ściernica 89A462K5V227/60, pozostałe parametry v_c = 50 m·s^{-1}, f = 3 mm·obr.$^{-1}$) [49]

Inne wartości naprężeń własnych powstają podczas obróbki plastycznej. Z badań wynika, że w warstwie wierzchniej nagniatanej wartości ujemne naprężenia są znacznie większe niż np. dla dogładzania. Porównanie makronaprężeń powstałych w warstwie wierzchniej w wyniku różnych obróbek przedstawiono na rysunku 2.12 [167].



Rys. 2.12. Rozkład makronaprężeń w warstwie wierzchniej: 1 – dogładzanej, 2 – nagniatanej siłą 400 N, 3 – nagniatanej siłą 900 N [167]

W literaturze można spotkać również modele matematyczne dotyczące zależności naprężeń własnych od parametrów obróbki [42, 119].

W tabeli 2.1 przedstawiono takie zależności naprężeń własnych od prędkości szlifowania dla różnych kombinacji parametrów. Badania eksperymentalne

przeprowadzono na szlifierce RUP-28 z zastosowaniem cieczy chłodzącej oraz ściernicy oznaczonej 89A462K5V227/60.

Tabela 2.1. Równania regresji wyznaczające wartość naprężeń powstałych w warstwie wierzchniej po szlifowaniu [49]

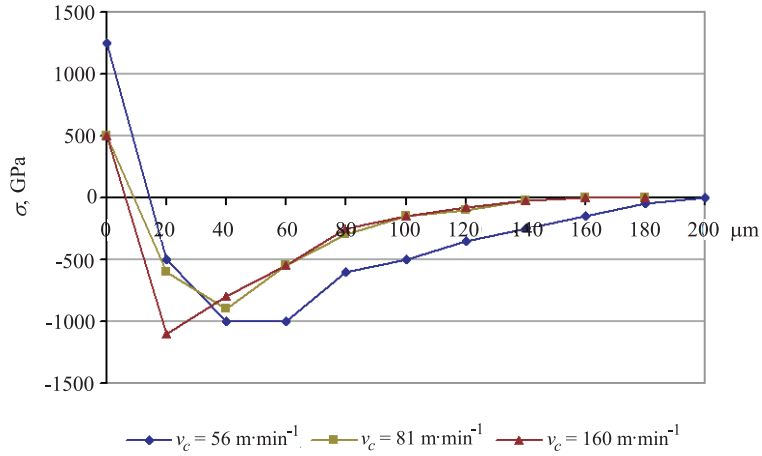
Stosunek prędkości v_c/v_w	Posuw mm·obr.$^{-1}$	Głębokość szlifowania mm	Objętość materiału usuwanego mm^3	Zależność naprężeń własnych od prędkości szlifowania
30	**3**	**0,01**	**1000**	$\sigma = -6{,}8 \cdot 10^{-4} \cdot v_c^2 + 0{,}0548 \cdot v_c - 1{,}312$
30	**12**	**0,03**	**1000**	$\sigma = -6{,}88 \cdot 10^{-4} \cdot v_c^2 + 0{,}0796 \cdot v_c - 1{,}361$
60	**3**	**0,01**	**1000**	$\sigma = -4{,}66 \cdot 10^{-4} \cdot v_c^2 + 0{,}0507 \cdot v_c - 1{,}461$
60	**12**	**0,03**	**1000**	$\sigma = -4{,}66 \cdot 10^{-4} \cdot v_c^2 + 0{,}0603 \cdot v_c - 1{,}311$
90	**3**	**0,01**	**1000**	$\sigma = -3{,}38 \cdot 10^{-4} \cdot v_c^2 + 0{,}0493 \cdot v_c - 1{,}461$
90	**12**	**0,03**	**1000**	$\sigma = -3{,}38 \cdot 10^{-4} \cdot v_c^2 + 0{,}0576 \cdot v_c - 1{,}311$

Przedstawione w tabeli 2.1 zależności mogą być stosowane w zakresie prędkości szlifowania $v_c = 30 \div 60$ m·s^{-1}.

Analiza stanu naprężeń własnych ma istotne znaczenie z uwagi na ich wpływ na właściwości mechaniczne: zarówno korzystny, jak i szkodliwy [39, 164].

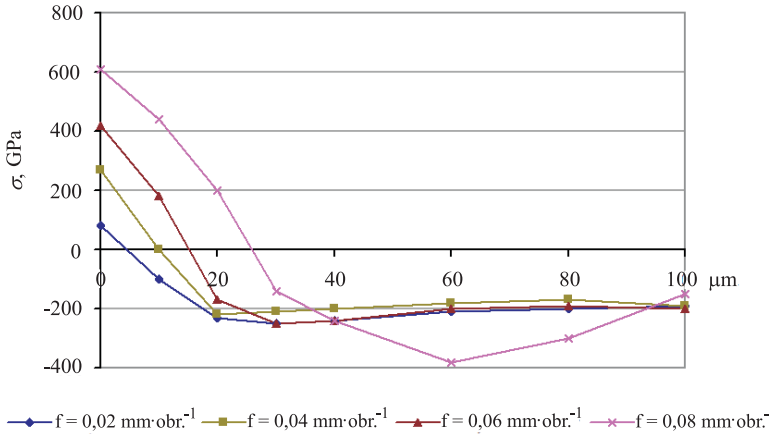
Rodzaj i wartość naprężeń własnych dla danego materiału obrabianego zależy od stosowanych parametrów skrawania. Wpływ prędkości skrawania na powstawanie powierzchniowych naprężeń rozciągających omówiono w pracach [92, 137].

Wzrost wartości prędkości skrawania powoduje nieznaczny spadek głębokości występowania maksymalnych naprężeń ściskających – rysunek 2.13.



Rys. 2.13. Naprężenia własne w zależności od prędkości skrawania i odległości (głębokości zalegania) w głąb materiału (stal 100Cr6, 62 HRC) [96]

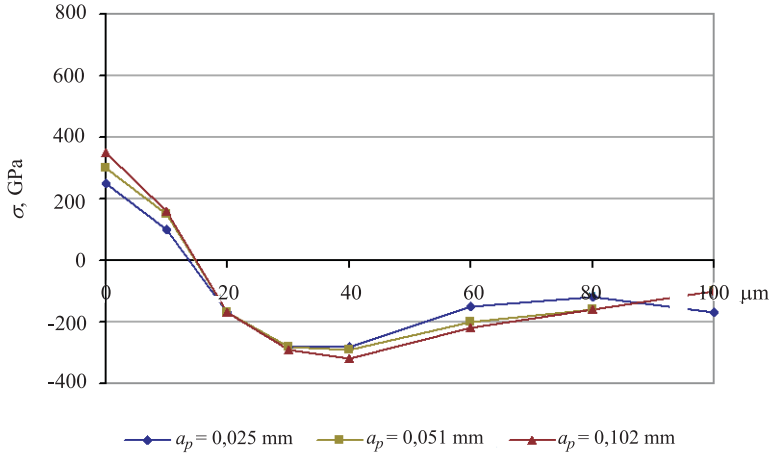
Wpływ posuwu na rodzaj i wartość naprężeń własnych oraz głębokość ich zalegania przedstawiono na rysunku 2.14.



Rys. 2.14. Naprężenia własne w zależności od posuwu skrawania i odległości (głębokości zalegania) w głąb materiału (stal 58-62 HRC) [99]

Analizując powyższe graficzne zależności, można stwierdzić, że posuw w istotny sposób wpływa na naprężenia własne powstałe w warstwie. Wraz ze wzrostem głębokości zalegania tych naprężeń wpływ ten zanika. Im większa wartość posuwu, tym większe naprężenia rozciągające na powierzchni warstwy wierzchniej.

Zmiana głębokości skrawania w niewielkim stopniu wpływa na naprężenia własne warstwy wierzchniej elementów toczonych na sucho, co jest widoczne na rysunku 2.15.



Rys. 2.15. Naprężenia własne w zależności od głębokości zalegania dla różnych głębokości skrawania (stal 58-62 HRC) [99]

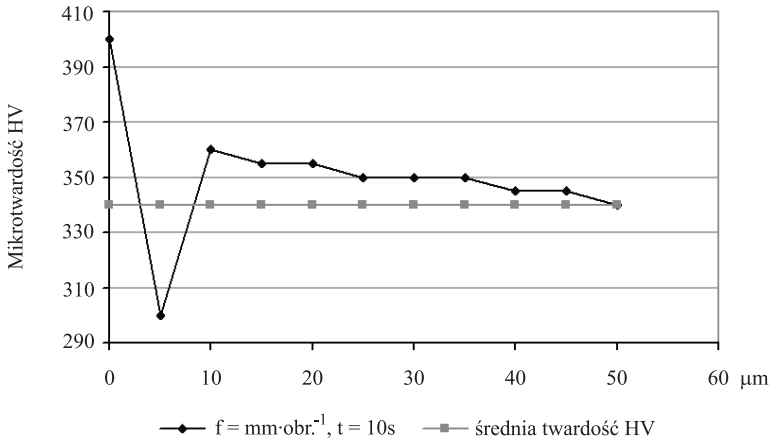
Ze względu na sposób wzajemnego oddziaływania elementów tocznych par kinematycznych podczas pracy – zmienny stan obciążeń – jako rezultat zrealizowanego procesu technologicznego – w warstwie wierzchniej należy wywołać naprężenia ściskające [15]. Trzeba jednak pamiętać, że obecność naprężeń własnych ściskających w WW może zmniejszać wielkość zużycia tylko do pewnej wartości siły nacisku pomiędzy współpracującymi powierzchniami [129].

2.2.3. Relacje między twardością i mikrotwardością powierzchni a czynnikami procesu wytwarzania

Właściwości fizyczne warstwy wierzchniej mają znaczenie dla stabilności procesu technologicznego oraz cech eksploatacyjnych elementów. Oprócz naprężeń własnych, twardość i mikrotwardość warstwy wierzchniej jest czynnikiem wpływającym na wytrzymałość zmęczeniową, dlatego istotna jest analiza stanu umocnienia powierzchni.

Zmianę twardości warstwy wierzchniej otrzymuje się głównie w wyniku obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej, a także poprzez nanoszenie powłok na warstwę.

Mikrotwardość warstwy wierzchniej materiału twardego, stopu tytanu, toczonej na sucho początkowo maleje – zmiękczenie w wysokiej temperaturze, a następnie wzrasta – świadczyć to może o utwardzeniu materiału na tej głębokości (rys. 2.16).



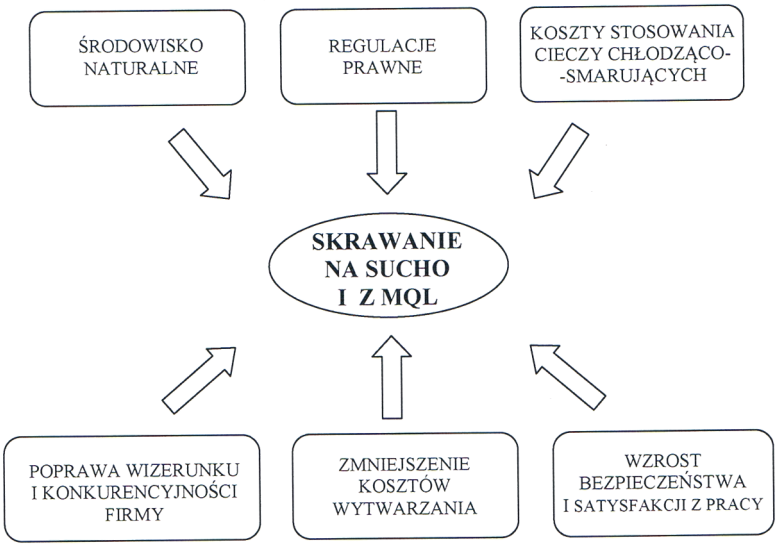
Rys. 2.16. Mikrotwardość w zależności od głębokości zalegania w warstwie wierzchniej toczonej na sucho (stop Ti-6% Al-4% V, v = 100 m·min^{-1}, a_p = 2 mm) [24]

2.2.4. Ciecze chłodząco-smarujące w procesie obróbki skrawaniem

Ciecze chłodząco-smarujące znajdują powszechne zastosowanie w procesach obróbki skrawaniem. Wywierają wpływ na trwałość ostrzy narzędzi skrawających, dokładność wymiarów i jakość obrobionych powierzchni przedmiotów, a także oddziałują na proces kształtowania wiórów i zjawiska występujące w strefie skrawania [56, 98]. W ostatnich latach, pomimo wielu zalet wynikających z ich stosowania, coraz częściej są uznawane za czynnik niepożądany w procesie skrawania. Wynika to nie tylko ze względów ekonomicznych. Szacuje się, że stosowanie cieczy obróbkowych stanowi 16,8% kosztów wytwarzania, zaczęto jednak zwracać uwagę na aspekty ekologiczne i konieczność dostosowania się do coraz bardziej rygorystycznych przepisów związanych z ochroną środowiska i BHP [53, 67, 76]. Składowanie i utylizacja zużytych cieczy obróbkowych powoduje zagrożenie dla środowiska naturalnego [52, 127, 190].

Dotychczasowe badania wykazały, że w pewnych warunkach stosowanie tych dwóch metod pozwala na uzyskanie wyników (siły skrawania, trwałość narzędzi, chropowatość powierzchni obrobionej) porównywalnych z obróbką z konwencjonalnym podawaniem cieczy obróbkowej [23, 128].

Uwarunkowania i korzyści powstałe w wyniku skrawania na sucho i z MQL omówiono w pracach [81, 82, 126, 153, 190, 201, 205] oraz przedstawiono na rysunku 2.17.



Rys. 2.17. Uwarunkowania i korzyści skrawania na sucho i z MQL [190]

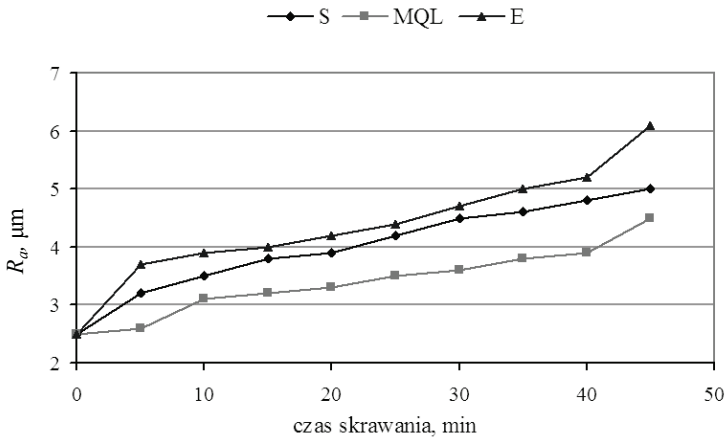
Podczas obróbki na sucho powstające ciepło gromadzi się w narzędziu, w materiale obrabianym i we wiórach. Część tego ciepła odprowadzana jest do otoczenia, pozostająca część powinna być jak najszybciej usunięta ze strefy skrawania.

W konwencjonalnych metodach chłodzenia (na mokro) ciepło to usuwane jest wraz z cieczą chłodząco-smarującą. W obróbce na sucho następuje to w wyniku zastosowania odpowiedniego kształtu narzędzia [70, 71, 198].

Ważnym elementem jest zabezpieczenie termiczne narzędzia podczas obróbki na sucho przed nadmiernym wzrostem temperatury. W tym celu ostrza skrawające pokrywa się specjalnymi twardymi warstwami [204].

W obróbce na sucho funkcje realizowane przez ciecz chłodząco-smarującą, oprócz narzędzia, przejmuje również obrabiarka. Znaczna część ciepła gromadzi się we wiórach, dlatego konstrukcja obrabiarki, a w szczególności układ przestrzeni roboczej powinien przeciwdziałać oddziaływaniu ciepła na dokładność obrobionego przedmiotu. Maszyna robocza stosowana w tej obróbce powinna również pozwalać na pracę przy dużych wartościach parametrów skrawania [38, 189].

Wpływ sposobu chłodzenia i smarowania strefy skrawania na chropowatość podczas toczenia przedstawiono w pracy [83]. Porównując wartości parametru R_a (rys. 2.18) dla obróbki na sucho – S, z minimalnym (60 ml·h^{-1}) – MQL i konwencjonalnym chłodzeniem (emulsją) – E, stwierdzono że największymi wartościami tego parametru charakteryzuje się obróbka z konwencjonalnym chłodzeniem.



Rys. 2.18. Zależność chropowatości powierzchni R_a od czasu skrawania w warunkach toczenia na sucho (S), z minimalnym (MQL) oraz konwencjonalnym (E) chłodzeniem i smarowaniem (stal 34CrNiMo6) [28]

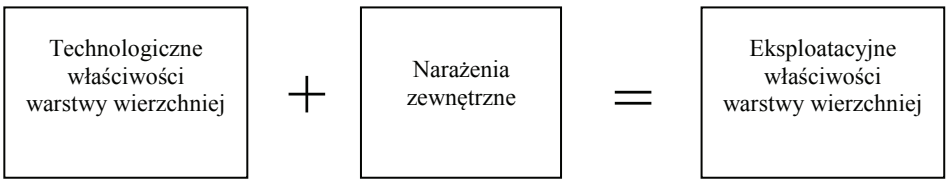
Aspekt ekologiczny obróbki skrawaniem, przedstawiony powyżej, stanowi ważny sygnał do wyeliminowania lub ograniczenia cieczy obróbkowych w procesach wytwórczych.

2.3. EKSPLOATACYJNA WARSTWA WIERZCHNIA

Procesy tribologiczne tarcia i zużywania zależą od wielu czynników. Do rozpoznania tych czynników niezbędne jest przeprowadzenie doświadczeń stanowiących źródło nowych informacji o procesach i materiałach tribologicznych.

Podstawowym elementem tych doświadczeń jest warstwa wierzchnia, która wytwarzana jest w określonym celu, przeznaczona do współpracy i narażona na wymuszenia zewnętrzne (chemiczne i fizyczne).

Na rysunku 2.19 przedstawiono ogólny schemat powstawania eksploatacyjnej warstwy wierzchniej, którą stanowi technologiczna warstwa wierzchnia poddana wymuszeniom zewnętrznym. Cechy tej warstwy zmieniają się wraz z czasem pracy pary kinematycznej.



Rys. 2.19. Właściwości eksploatacyjne warstwy wierzchniej [22]

2.3.1. Zjawiska tribologiczne zachodzące w parach kinematycznych ze stykiem skoncentrowanym

Do najistotniejszych zjawisk zachodzących w układzie tribologicznym podczas współpracy elementów należą procesy tarcia i zużywania. Według Leszka [84] wszystkie inne parametry: konstrukcyjne, materiałowe, eksploatacyjne mają charakter ogólnotechniczny.

Do typowych par kinematycznych ze stykiem skoncentrowanym (niekonforemnym), będących przedmiotem analiz, zalicza się:

- łożyska toczne,
- prowadnice toczne,
- przekładnie zębate.

Zjawiskami elementarnymi zachodzącymi w wyżej wymienionych parach kinematycznych, mających istotny wpływ na przebieg procesu zmian, a także na cechy użytkowe, są [173]:

- mikro- i makropoślizgi,
- histereza odkształceń,
- tarcie w środku smarowym,
- adhezja.

Wyróżnia się dwie podstawowe przyczyny występowania poślizgów w parach tocznych [100, 155]. Pierwsza z nich to fakt, że materiały używane do wytwarzania elementów nie są idealnie sztywne, druga zaś wynika z geometrii strefy kontaktu.

Podczas pracy np. łożysk, na skutek działania obciążenia zewnętrznego, między elementami tocznymi a bieżniami zamiast teoretycznego styku punktowego istnieje styk powierzchniowy. Powierzchnie te są bardzo małe, dlatego w obszarze styku występują duże naciski, których wartość określić można za pomocą ogólnie znanych zależności opracowanych teoretycznie przez Hertza. Odkształcenia współpracujących elementów tocznych w strefie ich kontaktu – wywołane obciążeniem zewnętrznym – powodują przemieszczenia materiału. Szerokość strefy styku jest mała w porównaniu z promieniami elementów tocznych, a przemieszczenia są tego samego rzędu, co szerokość strefy styku, czyli bardzo małe, stąd poślizgi te nazywa się mikropoślizgami.

Na skutek odkształceń elementów tocznych, pod wpływem obciążenia zmieniają się geometryczne warunki ich przylegania – inny jest także przebieg poślizgów. Obraz poślizgów w strefie styku – ich kierunek i zwrot – zależny jest od kinematyki względnych ruchów elementów tocznych. Ze względu na skalę, w jakiej występują, tę odmianę poślizgów nazywa się makropoślizgami. Ten rodzaj poślizgów wynika głównie z geometrycznych cech konstrukcyjnych.

Kolejnym zjawiskiem towarzyszącym tarciu tocznemu i wywołującym zużycie tocznych par kinematycznych jest histereza odkształceń. Podczas toczenia się jednego ciała po drugim w jednym kierunku w przedniej części powierzchni zetknięcia następuje zwiększenie wzajemnego nacisku, natomiast w tylnej czę-

ści – jego zmniejszenie. Przy obciążaniu metali w granicach sprężystości między naprężeniami a odkształceniem jest inna zależność niż w trakcie odciążania. Praca deformacji sprężystej wykonana przy obciążaniu nie zwraca się więc w całości przy odciążaniu. Zjawisko histerezy dowodzi, że przy odkształcaniu ciał rzeczywistych nie występuje proces doskonale sprężysty – praca deformacji zostaje zwrócona tylko częściowo.

O zakresie oddziaływania zjawiska histerezy odkształceń (a dokładniej – skutków naprężeń kontaktowych wywołujących odkształcenia sprężysto-plastyczne) na powierzchniowe zużycie zmęczeniowe decyduje z jednej strony wartość i charakter zewnętrznego obciążenia, z drugiej zaś geometria strefy, która z kolei zależy od geometrycznych i materiałowych CK.

Tarciu tocznemu, jak wcześniej przedstawiono, towarzyszą makropoślizgi. Aby zmniejszyć skutki tego zjawiska, stosuje się środek smarowy. Obecność tego medium powoduje wewnętrzne opory, wywołane siłami adhezji oraz wewnętrznymi siłami tarcia tego środka. Niezbędne jest dostarczenie energii, która następnie oddawana jest do otoczenia w postaci ciepła.

Udział w procesie zużywania ma także adhezja, która może występować między elementami łożyska. Ma ona bezpośredni związek z tarciem ślizgowym, występuje głównie w styku elementów tocznych np. z koszykiem.

Obecność środka smarowego powoduje, że między nim a materiałem elementów tocznych zachodzić mogą reakcje tribochemiczne, pochłaniające także część włożonej do układu energii i intensyfikujące proces zużywania.

2.3.2. Czynniki determinujące zmiany w warstwie wierzchniej podczas jej eksploatacji

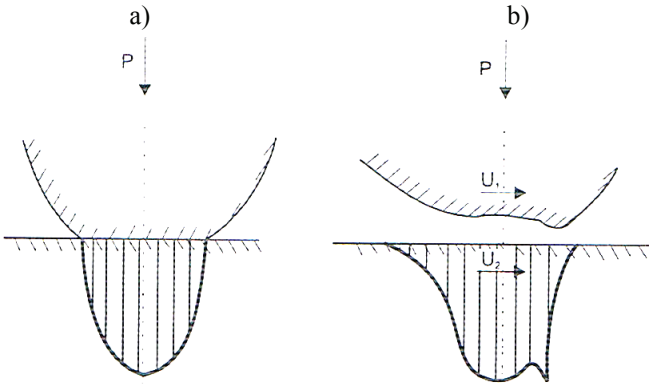
Uwzględniając istotę procesu tarcia tocznego, jako wymuszenia determinujące przyjmuje się:

- obciążenie – amplitudę nacisków w strefie kontaktu,
- częstotliwość zmian,
- otoczenie (temperatura, wilgotność),
- obecność czynnika smarowego.

Najistotniejszym czynnikiem oddziałującym na współpracujące pary kinematyczne są przenoszone przezeń obciążenia.

Jako miarę obciążenia styku niekonforemnego przyjmuje się przede wszystkim maksymalne naciski. Do wyznaczania wartości nacisków zarówno dla styku skoncentrowanego niesmarowanego (rys. 2.20a), jak i smarowanego (rys. 2.20b) stosuje się głównie, jak już wcześniej wspomniano, wzory Herzta. W niektórych przypadkach (wyznaczenie nacisków umownych) zastosowanie mają wzory Stribecka [181].

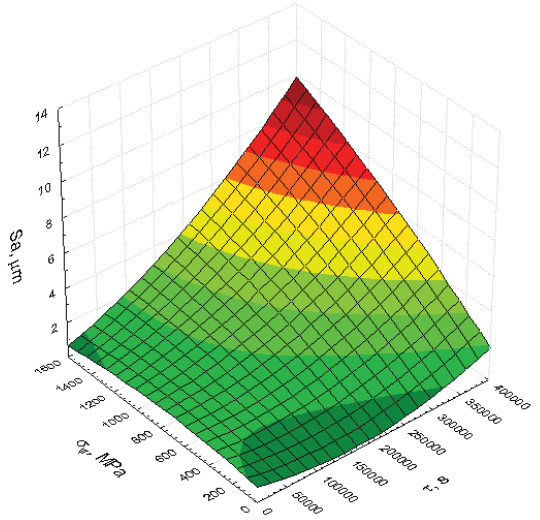
W przypadku smarowania elastohydrodynamicznego (rys. 2.20) widoczne jest drugie maksimum ciśnienia charakterystyczne dla tego typu smarowania.



Rys. 2.20. Rozkład nacisków w strefie styku skoncentrowanego: a) niesmarowanego, b) smarowanego (P – siła nacisku, U_1 – prędkość poślizgu elementu tocznego, U_2 – prędkość poślizgu bieżni) [181]

W literaturze opisano szereg badań [104, 108, 110, 114] dotyczących wpływu obciążenia zewnętrznego na parametry struktury geometrycznej powierzchni.

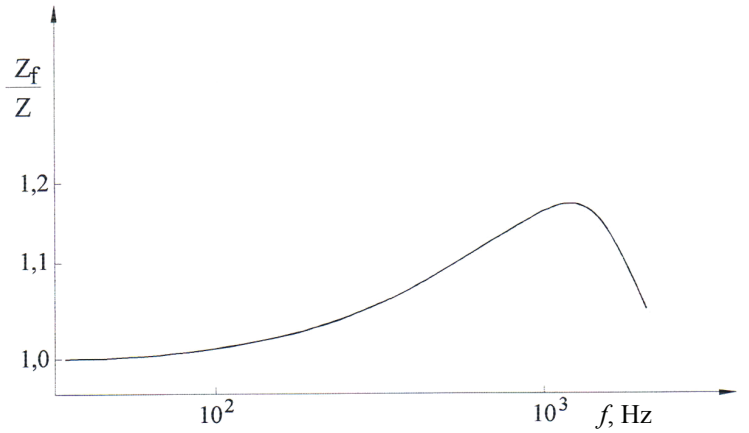
Zależność parametru chropowatości S_a od amplitudy nacisków σ_ψ i czasu τ, dla skośnych łożysk kulkowych przedstawiono na rysunku 2.21.



Rys. 2.21. Zależność parametru chropowatości S_a od amplitudy nacisków σ_ψ i czasu τ pracy skośnych łożysk kulkowych [114]

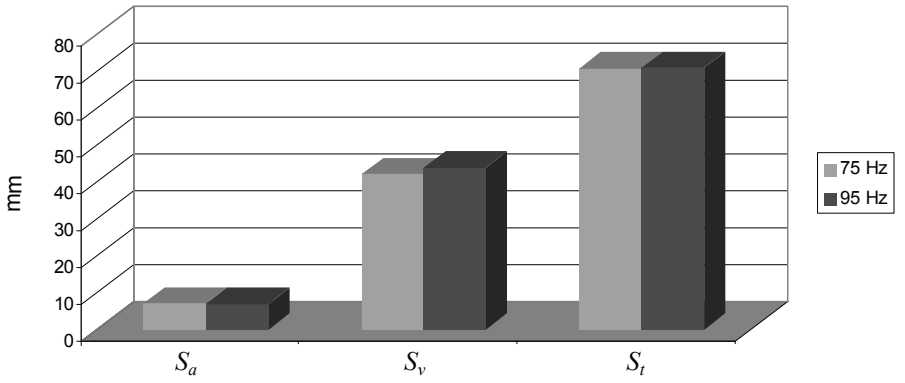
Wyraźna zmiana wartości parametru chropowatości następuje dopiero po przekroczeniu pewnego czasu pracy węzła tocznego – rysunek 2.21. Dla wartości obciążenia do 1000 MPa szybsze zmiany następowały po czasie 200000 s, zaś dla większych obciążeń – po czasie 100000 s. Chropowatość przyjmowała wartości największe dla maksymalnych czynników przyjętych w badaniach.

Częstotliwość *f* zmian obciążenia to istotny czynnik w procesie zużywania zmęczeniowego. W przypadku łożysk tocznych jest ona funkcją prędkości obrotowej, z jaką wirują elementy łożysk oraz liczby elementów tocznych. W przypadku objętościowego zmęczenia metali wykazano, że częstotliwość zmian do pewnej jej wartości nie ma wpływu (lub wpływ ten jest niewielki) na trwałość zmęczeniową [180] – rysunek 2.22. W literaturze brak jest potwierdzenia tego spostrzeżenia dotyczącego zmęczenia powierzchniowego.



Rys. 2.22. Wpływ częstotliwości zmian obciążenia *f* na wytrzymałość zmęczeniową stali konstrukcyjnych [180]

Prowadzone badania [109] dla skośnych łożysk kulkowych wykazały niewielki wpływ zmiany częstotliwości na chropowatość. Potwierdzeniem tego są przedstawione na rysunku 2.23 zmiany wartości parametrów chropowatości dla dwóch częstotliwości węzła tocznego pracującego pod obciążeniem σ_ψ = 621 MPa.



Rys. 2.23. Parametry chropowatości dla różnych wartości częstotliwości obciążenia skośnych łożysk kulkowych [109]

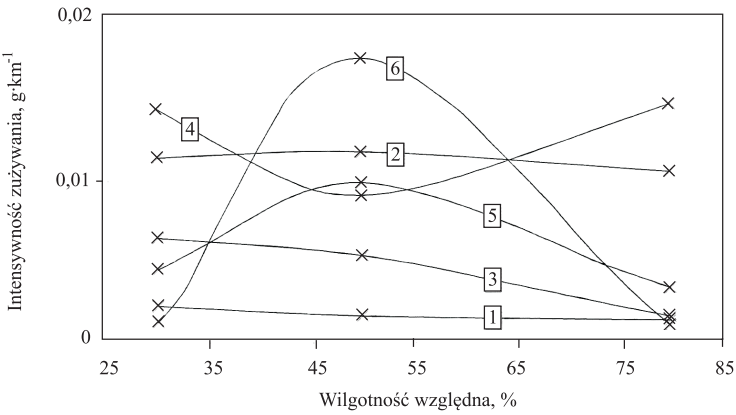
Na podstawie powyższego można stwierdzić, że zasadniczych zmian SGP w badanym zakresie zmienności tego czynnika nie obserwowano. Różnice nie są większe niż 2%, należy więc przyjąć, że mieszczą się w zakresie błędu statystycznego.

Inny czynnik – temperatura – ma istotne i wielostronne znaczeni dla zmian zachodzących w eksploatacyjnej warstwie wierzchniej. Analizując mechanizmy procesów cząstkowych towarzyszących tarciu tocznemu [62, 160, 170], jednoznacznie można stwierdzić, że dla przebiegu każdego z nich temperatura ma znaczenie. Na skutek wzrostu temperatury mogą nastąpić zmiany strukturalne i fazowe, zmiany wartości, a nawet znaku naprężeń własnych, zmiany wartości parametrów wytrzymałościowych, przyspieszenie (w przypadku wzrostu temperatury) reakcji chemicznych, jakie mogą zachodzić między aktywnymi składnikami środków smarowych oraz otoczenia a materiałem podłoża. W wyniku tych zmian czas, w jakim pary kinematyczne realizują poprawnie nałożone zadania, skraca się, czyli trwałość mechanizmów, w których pary te występują, zmniejsza się.

Podczas prawidłowej pracy węzłów tocznych wyraźny wzrost temperatury następuje jedynie w pierwszym okresie procesu zużywania i to głównie w początkowym jego stadium. Później temperatura się stabilizuje do momentu wejścia węzła tribologicznego w ostatni okres – szybkiego wzrostu intensywności zużywania.

Obserwowane zmiany temperatury powodują zmianę gradientu intensywności zużywania. Są one efektem wszystkich zachodzących procesów cząstkowych.

Jednym z pomijanych podczas badań tribologicznych parametrów otoczenia pracy pary kinematycznej jest wilgotność. Na rysunku 2.24 widoczne jest, że w większości przypadków badawczych wilgotność ma istotne znaczenie dla intensywności zużywania masowego – większe dla styku konforemnego, mniejsze dla niekonforemnego.



Rys. 2.24. Zależność intensywności zużywania od wilgotności atmosfery otaczającej skojarzenie tribologiczne i układu materiałowego: 1, 2 – ŁH15/ŁH15, 3, 4 – ŁH15/45, 5, 6 – ŁH15/B101, oraz charakter styku; 1, 3, 5 – skoncentrowany, 2, 4, 6 – rozłożony [199]

Zaprezentowane w pracy [25] wyniki badań wykazały, że w skojarzeniach zawierających elementy ceramiczne zużycie zwiększa się wraz ze wzrostem wilgotności medium otaczającego, natomiast w skojarzeniu stal-stal zużycie elementów współpracujących zmniejsza się ze wzrostem wilgotności.

Następnym czynnikiem wpływającym na proces tarcia tocznego jest obecność środka smarowego. Podstawowymi zadaniami środków smarowych stosowanych w tego typu parach kinematycznych są [138, 172, 176, 177]:

- zmniejszenie współczynnika tarcia i tym samym zmniejszenie intensywności procesu zużywania,
- odprowadzanie ciepła powstającego jako rezultat pracy tarcia,
- odprowadzanie produktów zużycia ze strefy tarcia i eliminowania ich z obiegu w wyniku filtracji,
- ochrona przed korozją współpracujących elementów,
- tłumienie drgań.

W zależności od rodzaju, postaci i ilości środka smarowego różny może być stopień realizacji wymienionych zadań.

Przyczyn zróżnicowanych oddziaływań środków smarowych oraz ich dodatków na elementy węzłów tocznych należy upatrywać w różnych reakcjach tribochemicznych zachodzących między nimi a pierwiastkami lub składnikami fazowymi, występującymi w strukturze współpracujących elementów par kinematycznych.

Ilość środka smarowego w węźle łożyskowym powinna zapewniać oddzielenie przemieszczających się elementów tocznych od bieżni bardzo cienką warstewką – rzędu części mikrometra. Jedną z preferowanych obecnie zasad smarowania jest uzależnienie grubości filmu smarnego h od tzw. chropowatości zastępczej R_{az} wyrażonej wzorem (2.8) [175]:

$$\mathrm{R_{az}} = \sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2} \tag{2.8}$$

gdzie:

R_{a1} – chropowatość bieżni łożyska,
R_{a2} – chropowatość elementów tocznych.

Ze względów praktycznych korzystne jest, aby miarą grubości filmu była jego bezwymiarowa grubość względna λ wyrażona w postaci ilorazu (2.9):

$$\lambda = h/R_{az} \tag{2.9}$$

Toczne pary kinematyczne smarowane są środkami smarowymi pochodzenia mineralnego lub syntetycznego. W obu grupach występują one w trzech postaciach jako:

- płynne środki smarowe (oleje),
- smary plastyczne,
- smary stałe.

Produkty uzyskane w wyniku rafinacji ropy naftowej, będącej głównym surowcem do wytwarzania mineralnych płynnych i plastycznych środków smarowych, nie zawsze charakteryzują się wystarczającymi cechami eksploatacyjnymi i dlatego dodaje się do nich, tzw. dodatki uszlachetniające, które poprawiają określone cechy lub grupę tych cech. W literaturze podaje się informacje o licznych, różnorodnych dodatkach. Ich działanie można sprowadzić do trzech głównych funkcji [7, 47, 77, 120, 159]:

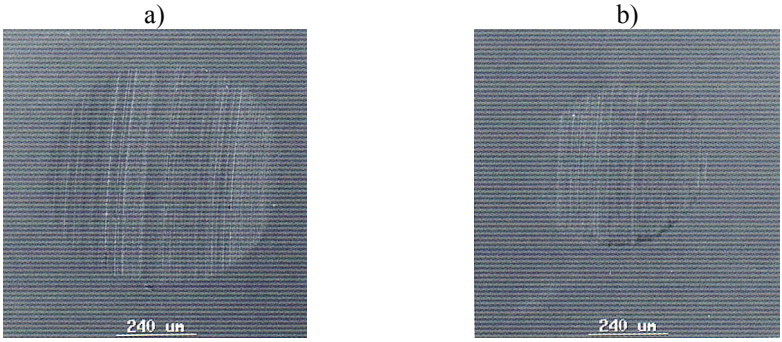
- obniżającej lepkość i zmniejszającej tarcie wewnętrzne: grafit, dwusiarczek molibdenu, PTFE, dodatki na bazie metali miękkich (Cu, Pb),
- zabezpieczającej przed utlenianiem się środków smarowych w wysokich temperaturach, np.: dwualkil dwufenyloaminya, alkil N-fenyl 1-naftyloaminy,
- przeciwzatarciowej: dodatki z grupy moczników.

Jako oddzielną grupę można wyróżnić dodatki sterujące tworzeniem się warstw granicznych pod wpływem pracy tarcia. W obecności cząstek organicznych środka smarowego, przy pracy tarcia wyzwalającej ładunki elektryczne, metal podłoża w formie zjonizowanej może tworzyć na powierzchniach roboczych ciernych par kinematycznych trzy rodzaje warstw granicznych [139, 170]: metaliczną, tlenkową lub polimerową. Wytrzymała warstwa graniczna związana z powierzchnią nominalną zabezpiecza współpracujące powierzchnie przed bezpośrednim ich oddziaływaniem, przede wszystkim mechanicznym.

Warstwa graniczna to czynnik występujący w zjawisku tarcia ślizgowego. Tarciu tocznemu zawsze towarzyszy tarcie ślizgowe, dlatego przy rozpatrywaniu procesu zużywania towarzyszącego tarciu tocznemu ten czynnik należy również uwzględnić.

Skuteczność dodatków uzależniona jest między innymi od warunków współpracy elementów tocznych, a także od ich procentowej zawartości w oleju bazowym. Mieszane z olejami mineralnymi dają w rezultacie środek smarowy łączący zalety jednej i drugiej odmiany olejów.

Na rysunku 2.25 porównano obrazy SEM (skaningowa mikroskopia elektronowa) powierzchni tarcia kulek stalowych smarowanych: a) olejem podstawowym, b) olejem zawierającym 3% m/m dodatku D2 (zawierający pierwiastki aktywne tribologiczne). Wprowadzenie dodatku spowodowało dwukrotne zmniejszenie śladu tarcia, a zużycie ścierne powierzchni mniej wyraźne (powierzchnia bardziej gładka) [95].



Rys. 2.25. Obraz SEM śladów zużycia powstałych w warunkach tarcia mieszanego na kulkach stalowych smarowanych: a) olejem podstawowym SAE 30/95, b) olejem SAE 30/95 zawierającym 3% dodatku D2 [92]

Skutecznym sposobem oceny poprawności pracy węzła tocznego smarowego jest kontrola zachowania się filmu elastohydrodynamicznego. Wskazanie momentu przerwania tego filmu pozwoli wyznaczyć granicę, po przekroczeniu której warunki pracy pary kinematycznej drastycznie się pogarszają, powodując obniżenie możliwości eksploatacyjnych [3].

Stwierdzić zatem można, że obecność środka smarowego ma działanie zarówno pozytywne, jak i negatywne. Przyczynia się bowiem do łagodzenia skutków zużywania, lecz z chwilą pojawienia się pęknięć przyspiesza ten proces. Należy zatem tak dobierać środek smarowy i jego ewentualne dodatki, aby minimalizować zjawiska negatywne, a intensyfikować – pozytywne.

2.3.3. Cechy użytkowe tocznych par kinematycznych

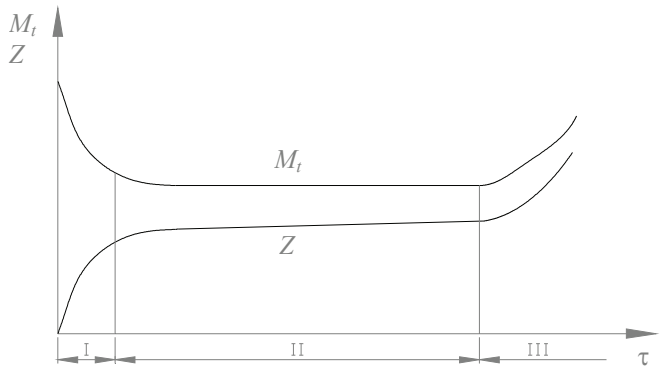
Przedstawione wcześniej czynniki decydują o cechach użytkowych maszyn. Do wielkości, których miary można wykorzystać do oceny cech użytkowych, zalicza się:

- zużycie,
- opory ruchu,
- strukturę geometryczną powierzchni.

Jedną z wielkości opisujących cechy eksploatacyjnej warstwy wierzchniej jest zużycie [12, 66]. W zależności od specyfiki: kinematyki ruchu, doboru materiałów, obciążeń, chropowatości powierzchni, warunków smarowania itp., proces ten będzie miał różny charakter.

Proces zużywania scharakteryzować można krzywą Lorenca, wyróżnia się w nim trzy główne okresy (rys. 2.26):

I – szybkiego wzrostu intensywności zużywania (docieranie),
II – ustalonego poziomu lub niewielkich zmian zużycia,
III – ponownie szybkiego wzrostu intensywności zużywania.



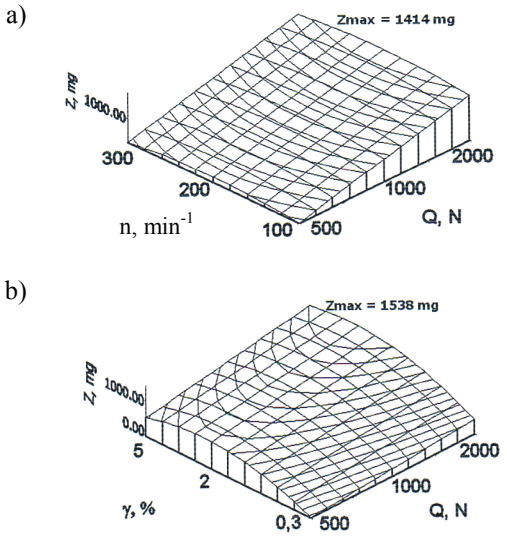
Rys. 2.26. Graficzny zapis typowego procesu zużywania Z oraz zmian oporów ruchu M_t w czasie τ

Chropowatość powierzchni jest istotna w I okresie (docierania) lub gdy zużycie jest mniejsze niż wysokość nierówności, w II okresie nierówności powierzchni mają mniejszy wpływ, natomiast w III – znaczenie mają przede wszystkim parametry fizyczne warstwy wierzchniej.

Jako miary tej cechy, w zależności od przyjętej metody pomiaru, można przyjąć zużycie:

- masowe,
- liniowe,
- objętościowe.

W pracach [9, 194] autorzy przedstawili zależność zużycia masowego od obciążenia, prędkości obrotowej i poślizgu (rys. 2.27). Elementami badanymi były: para toczna składająca się z próbki ze stali szynowej 900A i przeciwpróbki ze stali łożyskowej 100Cr6. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem obciążenia wzrasta zużycie rolki. Wzrost poślizgu początkowo skutkuje zwiększeniem, a następnie po przekroczeniu wartości poślizgu 3% zmniejszeniem zużycia masowego. Początkowe zwiększenie zużycia spowodowane jest zmianą mechanizmu zużywania, ze zmęczenia stykowego na zmęczenie adhezyjne z pękaniem. Mniejszy wzrost powyżej 3% wartości poślizgu spowodowany jest natomiast obecnością tlenków.

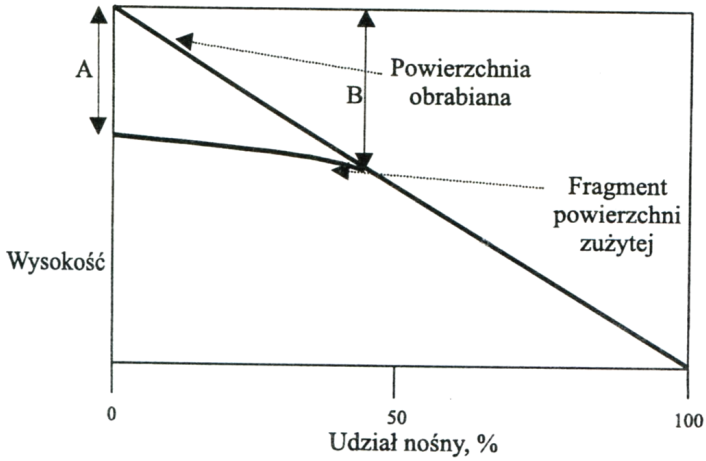


Rys. 2.27. Zależność ubytku masy od: a) prędkości obrotowej i obciążenia oraz b) poślizgu i obciążenia (Z – zużycie masowe, Q – obciążenie, n – prędkość obrotowa, γ – poślizg) [9]

Topografia powierzchni (stereometria) jest jednym z głównych czynników, oprócz warunków pracy węzła tribologicznego i właściwości materiałowych, mających wpływ na występowanie i rodzaj zużycia [72], zwłaszcza w początkowym okresie współpracy elementów tocznych (docierania).

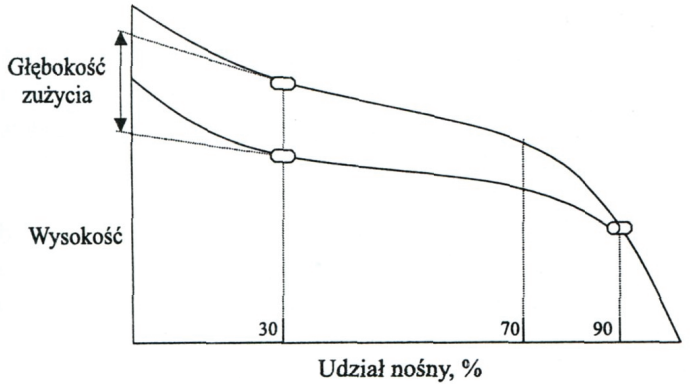
W przypadku zużycia zerowego (występuje wtedy, gdy zużycie liniowe jest mniejsze od maksymalnej chropowatości powierzchni lub ubytek materiału jest mniejszy niż połowa nierówności chropowatości), gdy ślady obróbki są zachowane na powierzchni istnieją trudności w określeniu zużycia. Tę cechę eksploatacyjnej warstwy wierzchniej można wyznaczyć na podstawie pomiarów SGP w tym samym miejscu przed badaniami i po ich wykonaniu tzw. metodą relokacji. Metodę tę po raz pierwszy zastosowali Williamson i Hunt [184], wykorzystując stolik relokacji do przeprowadzenia pomiarów w tym samym położeniu. Obecnie coraz częściej metody tej używa się również w odniesieniu do topografii powierzchni [57, 58, 142, 184].

Nie zawsze jest możliwe stosowanie metody relokacji. Można wówczas zużycie określić na podstawie pomiarów SGP po próbie tarcia – metodą profilometryczną. W pracy [59] autorzy zaproponowali ocenę zużycia dla powierzchni przy niewielkiej deformacji plastycznej. Niezbędne jest, aby powierzchnia zużyta miała cechy powierzchni przed zużyciem. Inną metodę, zaprezentowaną przez Dunaevsky'ego, zastosowano w badaniach przedstawionych w pracy [33]. Graficzną interpretacje metody oszacowania zużycia zaprezentowano na rysunku 2.28. Zużycie liniowe określone na podstawie wykresu nośności zawiera się między wymiarami A – B.



Rys. 2.28. Graficzna interpretacja metody oszacowania zużycia [141]

Do oceny wartości zużycia zastosowano również wykres udziału materiałowego [75, 142, 147]. W pracy [75] dokonano oszacowania zużycia liniowego i objętościowego. Wartość zużycia określono na podstawie przedłużenia liniowego krzywych nośności powierzchni zużytej (dolna krzywa – rys. 2.29) i przed próbą zużycia (górna krzywa – rys. 2.29). Utrudnieniem jest precyzyjne określenie miejsca pomiarowego przed i po próbie.

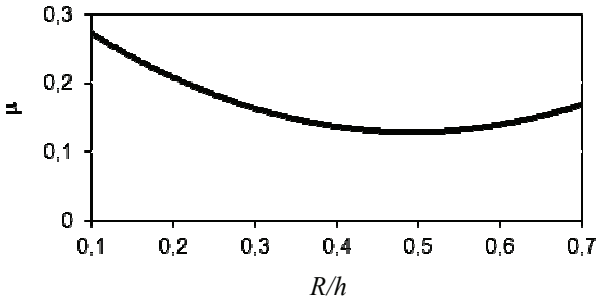


Rys. 2.29. Graficzna interpretacja metody oszacowania wartości zużycia w oparciu o krzywą materiałową [75]

Podjęto również próbę oceny zużycia objętościowego na podstawie parametrów topografii. Autorzy pracy [188] wskazują zależność tej formy zużycia od zmiany parametru S_a, który ma charakter wielomianu. Zastosowanie praktyczne takich analiz jest ograniczone do przypadku, w którym można zastosować pomiar tylko parametru S_a.

Drugą z cech użytkowych eksploatacyjnej warstwy wierzchniej są opory ruchu, które można wyrazić współczynnikiem tarcia lub momentem tarcia.

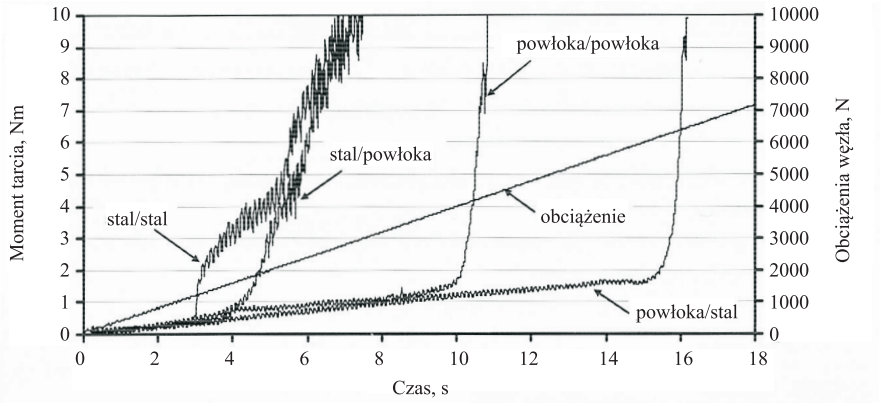
Podczas tarcia tocznego w obecności środka smarnego obserwuje się zmniejszenie wartości współczynnika tarcia wraz ze wzrostem chropowatości, natomiast z dalszym wzrostem chropowatości następuje również wzrost współczynnika tarcia – rysunek 2.30 [74].



Rys. 2.30. Zależność stosunku chropowatości R do grubości filmu olejowego h na współczynnik tarcia tocznego [74]

Badania dotyczące momentu tarcia prowadzone przez wielu badaczy [4, 171] zajmujących się tocznymi węzłami tribologicznymi pozwalają jedynie na przybliżoną ocenę.

Przebieg momentu tarcia dla różnych kombinacji materiałowych przedstawiono na rysunku 2.31 [105]. Badania przeprowadzono dla czterech par materiałowych, za pomocą testera czterokulowego T-02, stosując metodę z narastającym obciążeniem [149]. Dla skojarzenia powłoka/powłoka (w badaniach zastosowano powłokę WC/C) i powłoka/stal po przekroczeniu obciążenia zacierającego następował nagły wzrost momentu tarcia prowadzący do zatarcia, natomiast dla skojarzenia stal/stal i stal/powłoka proces ten przebiegał łagodniej (rys. 2.31).



Rys. 2.31. Przebieg momentu tarcia dla skojarzeń: stal/stal, stal/powłoka, powłoka/powłoka, powłoka/stal [105]

Konieczne są dalsze badania zjawisk zachodzących podczas pracy tocznych par kinematycznych, przede wszystkim momentu tarcia, których wynikiem będzie opracowanie zależności pozwalających na dokładniejsze wyznaczanie tego parametru.

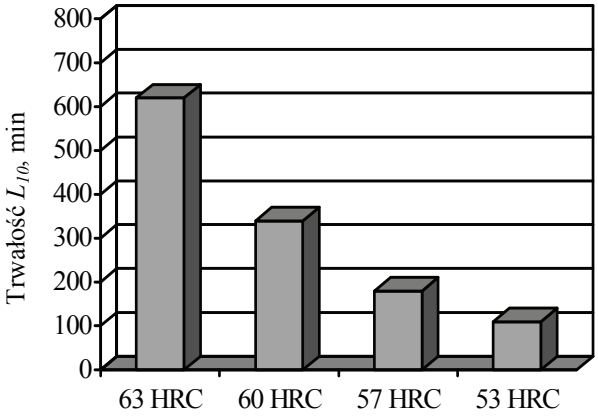
Takie zależności przedstawiono w pracy [170], gdzie na podstawie badań doświadczalnych zaproponowano równanie regresji opisujące zależność momentu oporu tocznego od wybranych cech konstrukcyjnych łożyska kulkowego skośnego (2.10):

$$M_t = \begin{pmatrix} -383{,}60 \cdot \delta_2 + 169{,}56 \cdot \delta_2^2 + 0{,}107 \cdot P_x^2 - 0{,}09193 \cdot H + 0{,}000117 \cdot H^2 \\ +256{,}431 \end{pmatrix} \cdot 10^{-4}, \text{ Nm} \quad (2.10)$$

Równanie to pozwala na określenie zależności między momentem tarcia a geometryczną cechą konstrukcyjną (współczynnik δ_2 – stosunek promienia krzywizny bieżni do promienia elementu tocznego, będący w granicach od 1,01 do 1,09), dynamiczną cechą konstrukcyjną (P_x – montażowe napięcie wstępne, o zakresie 10÷100 N) i materiałową cechą konstrukcyjną (H – twardość bieżni, mieszczące się w przedziale od 150 do 450 HV).

Jednym z głównych problemów pojawiających się w tocznych węzłach tarcia, w których występuje smarowany styk skoncentrowany, jest ich trwałość. Tendencje panujące w tribologii prowadzą do zmniejszenia zużycia materiałów, miniaturyzacji urządzeń eksploatacyjnych, a przez to do zwiększania mocy przenoszonej przez węzły tarcia.

Wyniki badań zawarte w pracy [148] wykazały, że zmniejszenie twardości elementów tocznych par kinematycznych powoduje spadek powierzchniowej trwałości zmęczeniowej badanych skojarzeń. Na rysunku 2.32 przedstawiono zależność trwałości zmęczeniowej w funkcji twardości tocznych elementów badanych, wykonanych ze stali 100Cr6.



Rys. 2.32. Powierzchniowa trwałość zmęczeniowa L_{10} badanych stożków wykonanych ze stali 100Cr6 o różnej twardości (smarowanych olejem mineralnym) [148]

Niewielki spadek twardości (z 63 do 60 HRC) powoduje dwukrotne zmniejszenie trwałości zmęczeniowej. Dalsze obniżenie twardości (o 3 stopnie HRC) skutkuje natomiast dalszym wyraźnym obniżeniem analizowanego parametru.

Twardość warstwy wierzchniej elementów współpracujących par tocznych ma bezpośredni związek z cechami użytkowymi tych węzłów. Jak jednak wykazały badania, znaczenie ma również sposób, w jaki określona twardość została uzyskana, a także parametry obróbki, przy których ją osiągnięto.

Tę cechę można również opisać równaniami regresji. W pracy [170] przedstawiono taką zależność trwałości skośnych łożysk kulkowych od cech konstrukcyjnych tych łożysk (2.11):

$$L_n = \left(48{,}487 \cdot \delta_2 - 24{,}297 \cdot \delta_2^2 + 0{,}06768 \cdot P_x - 0{,}00063 \cdot P_x^2 - 19{,}925\right) \cdot 10^6 \text{ obr.} \quad (2.11)$$

Przyjęto zmienne decyzyjne: bezwymiarowy współczynnik δ_2 stanowiący stosunek promienia krzywizny bieżni do promienia kulki i napięcie wstępne łożyska P_x wprowadzane podczas montażu.

W pracach [86, 87] autorzy badali zależności powierzchniowej trwałości zmęczeniowej wałeczków łożysk tocznych od kilku czynników: struktury geometrycznej powierzchni, stanu naprężeń własnych, twardości i mikrotwardości oraz własności fizykochemicznych materiału elementów tocznych. Po przeprowadzonych analizach (korelacji, czynnikowej, zbiorów zbliżonych, regresji wielokrotnej) zmierzających do optymalizowania liczby parametrów, zaproponowano równanie matematyczne o następującej postaci (2.12):

$$\begin{aligned} L_n = {} & 293 - 178 \cdot R_{3z} - 9{,}4 \cdot K + 206 \cdot R_{vk} - 41 \cdot \mu N - 0{,}1^{Xg} R_{ku} - \\ & + 0{,}06^{Xd} N - 34^{Xg} M_3 C_{POLE} - 286 \cdot R_a, \text{ mln cykli} \end{aligned} \quad (2.12)$$

gdzie:

R_{3z} – średnia wartość wysokość nierówności między trzecim wzniesieniem i wgłębieniem,
K – zawartość austenitu szczątkowego,
R_{vk} – średnia wartość zredukowanych głębokości wgłębień,
μN – średnie mikronaprężenia,
${}^{Xg}R_{ku}$ – górna granica 90% przedziału ufności dla ekscesu (kurtozy),
${}^{Xd}N$ – dolna granica 90% przedziału ufności dla naprężeń własnych,
${}^{Xg}M_3C_{POLE}$ – górna granica 90% przedziału ufności dla pól węglików,

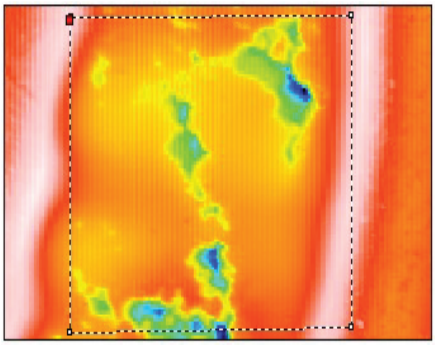
Przyjmując, że trwałość par kinematycznych powinna być jak największa, z powyższej zależności wynika, że elementy toczne (wałeczki w łożysku tocznym) powinny charakteryzować się małymi wartościami badanych parametrów poza parametrem R_{vk}.

Z grupy zmiennych struktury geometrycznej powierzchni najistotniejszy wpływ na cechy eksploatacyjnej warstwy wierzchniej elementów pary tocznej mają wysokościowe parametry chropowatości oraz odchyłka makrogeometrii. Ze względu na charakter współpracy elementów tocznych istotne jest, aby wartości tych parametrów były możliwie małe, tzn. by współpracujące powierzchnie były gładkie. Wymóg ten można uzasadnić tym, że współpracujące elementy w rzeczywistości stykają się ze sobą jedynie wierzchołkami mikronierówności i w związku z tym naprężenia w miejscach styku są bardzo duże, co jest czynnikiem przyspieszającym zużycie. Większa rzeczywista powierzchnia styku (dla mniejszej chropowatości) to mniejsze wartości naprężeń kontaktowych, a zatem i większa trwałość tocznych par kinematycznych.

Odchyłki makrogeometri elementów tocznych to czynnik, który determinuje wewnętrzne siły dynamiczne, jakie mogą powstawać w węźle tocznym podczas pracy. Siły te w dużym stopniu przyczyniają się do zmniejszenia trwałości zmęczeniowej.

W pracach [13, 54, 93, 103, 110, 112, 114, 115, 124, 125, 150, 158] wykazano, że poza wymienionymi czynnikami geometrycznymi wpływ na cechy warstwy wierzchniej podczas jej eksploatacji mają również: udział nośny i pochylenie profili chropowatości powierzchni oraz kierunkowość struktury. Struktura izotropowa (nieuporządkowana) powierzchni ze względu na warunki sprzyjające powstawaniu filmu smarowego jest korzystniejsza od struktury anizotropowej.

W pracy [113] do oceny badanych powierzchni wykorzystano wielkości opisujące elementarne fragmenty struktury geometrycznej powierzchni: wgłębienia i wzniesienia, jakie występują na powierzchni. Pomiary realizowano na powierzchni tocznej łożyska o wymiarach 2 × 2 mm. Postać graficzną tych analiz, dla czasu pracy węzła tribologicznego $3{,}9 \cdot 10^5$ s, przedstawiono na rysunku 2.33.



	wgłębienie	wzniesienie
powierzchnia, mm^2	1,18	0,094
objętość, μm^3	7651355	133871
max wartość, μm	35,0	5,22
średnia wartość, μm	6,5	1,43

Rys. 2.33. Wyniki pomiarów powierzchni roboczych łożysk kulkowych skośnych dla czasu pracy $\tau = 3{,}9 \cdot 10^5$ s [113]

Na powyższym rysunku można zaobserwować zmiany jakościowe zachodzące na powierzchni bieżni łożyska, potwierdzone ilościowo za pomocą przyjętych do tej oceny wielkości.

Należy zauważyć, że powierzchnia charakteryzuje się dużymi zagłębieniami odpowiednimi do okresu pracy skojarzenia.

Wyniki badań empirycznych są przesłanką do opisania modelami matematycznymi zmian poszczególnych parametrów SGP, zachodzących w wyniku oddziaływania wymuszeń eksploatacyjnych [117, 118].

W pracach [116-118] autorzy zaprezentowali zestaw równań dla przestrzennych parametrów chropowatości zarejestrowanych w czasie $\tau = 3{,}9 \cdot 10^5$ s pracy łożyska tocznego. Przykładowe zależności, w postaci wielomianów – drugiego (2.13) i trzeciego (2.14) stopnia, od wymuszenia zewnętrznego, jakim była amplituda nacisków, przedstawiono poniżej:

$$S_a = 0{,}246 + 10{,}744 \cdot \sigma_\psi - 3{,}329 \cdot \sigma_\psi^2, \mu m \tag{2.13}$$

$$S_a = 0{,}191 + 14{,}406 \cdot \sigma_\psi - 10{,}382 \cdot \sigma_\psi^2 + 3{,}125 \cdot \sigma_\psi^3, \ \mu m \tag{2.14}$$

Dalsze zwiększanie stopnia wielomianu spowoduje tylko nieznaczne poprawienie wartości statystyk, jednak połączone to będzie ze wzrostem złożoności modeli, co jest cechą niekorzystną dla praktyki przemysłowej.

Na podstawie przedstawionych powyżej rozważań można stwierdzić, że znajomość relacji między wymuszeniami w procesie eksploatacji a stanem warstwy wierzchniej umożliwia racjonalne sterowanie procesem użytkowania maszyny. Rezultatem takiego ujęcia zagadnienia jest zwiększenie trwałości maszyny i zmniejszenie jej awaryjności, co w konsekwencji powinno przynieść wymierne efekty ekonomiczne [195, 202, 203].

Ze względu na zastosowania praktyczne najistotniejsze są straty energetyczne i materiałowe układu tribologicznego [181]. Straty energetyczne ujmowane są zazwyczaj współczynnikiem tarcia lub momentem tarcia. Straty materiałowe opisuje się wielkościami zużycia określonymi miarą bezwzględną lub względną.

3. PODSUMOWANIE ANALIZY LITERATURY

Analiza literatury dotycząca tematyki pracy miała na celu ocenę stanu badań przejścia technologicznej w eksploatacyjną warstwę wierzchnią tocznych par kinematycznych. Na jej podstawie przedstawiono wnioski, tezę pracy oraz cel i zakres przeprowadzonych badań.

3.1. WNIOSKI Z PRZEGLĄDU LITERATURY

Przeprowadzone studium literaturowe pozwala na sformułowanie poniższych wniosków:

1. Kontynuowanie badań transformacji warstwy wierzchniej, zwłaszcza tocznych par kinematycznych, jest uzasadnione względami ekonomicznymi i technicznymi.
2. Ważnym elementem w transformacji jest okres między TWW a EWW.
3. Stan wiedzy dotyczącej powiązania topografii powierzchni z procesem wytwarzania i eksploatacji wskazuje na jej dominującą rolę w badaniach. Pomiar struktury geometrycznej powierzchni ma dwa główne zadania. Pierwsze dotyczy sprawdzenia poprawności procesu wytwarzania, natomiast drugie – przewidywania cech użytkowych powierzchni współpracujących. Topografia jest więc połączeniem zmian technologicznych i eksploatacyjnych.
4. Obserwuje się trend łącznego rozpatrywania geometrycznych cech powierzchni i zakładanych cech użytkowych.
5. Wielkości zmian naprężeń i odkształceń w strefie styku tocznych par kinematycznych w znaczącym stopniu zależą od właściwości i grubości warstwy wierzchniej oraz od obciążenia.
6. Zmiany powstające w początkowym okresie pracy łożysk tocznych stanowią niezbadaną przestrzeń poszukiwań naukowych.
7. Złożony obraz zjawisk zmian warstwy wierzchniej łożysk tocznych podczas eksploatacji wskazuje na trzy główne cechy użytkowe: zużycie, opory ruchu i zmiany topografii.
8. Modelowanie zużywania i oporów ruchu w tocznych parach kinematycznych z wykorzystaniem parametrów topografii powierzchni stanowi ważny aspekt badań tribologicznych.
9. Stosowanie zależności matematycznych w postaci wielomianów, określających poszczególne relacje, zawęża możliwości oceny tylko do badanego zakresu.

3.2. CEL, TEZA I ZAKRES PRACY

Podstawowym założonym, poznawczym celem pracy jest poznanie i opis relacji, tj. wyznaczenie charakterystyk technologiczno-eksploatacyjnych, między parametrami operacji technologicznych realizowanych w procesie wytwórczym w określonych warunkach a wielkościami opisującymi użytkowe cechy

warstwy wierzchniej elementów par kinematycznych z przewagą tarcia tocznego w okresie docierania.

Na podstawie powyższych stwierdzeń można sformułować następującą tezę naukową:

znając relacje cząstkowe, w okresie docierania tocznych par kinematycznych, możliwe jest wyznaczenie zależności łączących parametry procesu wytwarzania, realizowanego w określonych warunkach z wielkościami opisującymi cechy użytkowe.

Pozytywne zweryfikowanie tezy stanowi potwierdzenie osiągnięcia założonego celu, co wymaga zrealizowania następujących zadań:

- określenie zbioru najistotniejszych wymuszeń zewnętrznych wpływających na zmiany zachodzące w warstwie wierzchniej na każdym etapie jej istnienia,
- przeprowadzenie badań doświadczalnych i analiz statystycznych wpływu czynników obróbki na topografię otrzymanych powierzchni,
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych i określenie relacji zmian powstających w skojarzeniu tocznym w początkowym okresie eksploatacji,
- opracowanie modeli matematycznych w celu określenia zależności cech użytkowych warstwy wierzchniej od parametrów technologicznych.

Praca oparta jest na badaniach doświadczalnych i teoretycznych. Badania doświadczalne przeprowadzono w dwóch fazach. Pierwsza z nich dotyczy kształtowania cech warstwy wierzchniej w operacjach technologicznych obróbki skrawaniem, bez stosowania cieczy chłodząco-smarujących. Dokonano pomiaru obiektu badań w aspekcie geometrycznej cechy warstwy wierzchniej ukonstytuowanej w realizowanym procesie technologicznym. Do oceny stereometrii badanych powierzchni przyjęto standardowo wyznaczone parametry, którymi można sterować za pomocą parametrów obróbki.

Próbki, wykonane przy określonym zbiorze warunków i parametrów obróbki skrawaniem, w drugiej fazie badań poddano procesowi eksploatacji w zdefiniowanych warunkach, co pozwoliło określić relacje między rezultatami procesu skrawania a cechami użytkowymi par kinematycznych z warstwami wierzchnimi ich elementów ukonstytuowanymi w ten sposób. W badaniach jako analizowane cechy przyjęto: moment tarcia, zużycie liniowe i parametry struktury geometrycznej powierzchni.

W badaniach analitycznych, które stanowią integralną część, określono zależności matematyczne zaobserwowanych zjawisk.

Końcowym efektem pracy są modele określające charakterystyki technologiczno-eksploatacyjne i przedstawiające relacje zarejestrowane w badaniach eksperymentalnych. Określono więc najbardziej istotne czynniki pozwalające zaplanować proces technologiczny zapewniający parom kinematycznym, a w konsekwencji całej maszynie, cechy użytkowe (np. trwałość, moment tarcia) na poziomie zgodnym z potrzebami.

4. BADANIA WŁASNE

Zasadniczym celem eksperymentalnych badań własnych było określenie zmian cech użytkowych powierzchni roboczych stosowanych w walcowych łożyskach tocznych w początkowym okresie ich pracy.

Badania podzielono na dwa etapy dotyczące technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej. Na pierwszym z nich wyznaczono parametry struktury geometrycznej powierzchni podczas kształtowania warstwy wierzchniej toczeniem na sucho. W badaniach wstępnych wykorzystano parametry SGP w układzie 2D, zaś w badaniach zasadniczych w układzie 3D. Przeprowadzone badania eksperymentalne pozwoliły na otrzymanie zależności matematycznych, dotyczących prognozowania struktury geometrycznej powierzchni powstałej po obróbce wiórowej. Analizowane w tej części powierzchnie stanowiły w dalszej części obiekt badań eksploatacyjnych.

Na drugim etapie określono zmiany cech eksploatacyjnych warstwy wierzchniej badanych powierzchni w okresie docierania, czyli przejścia między warstwą technologiczną a eksploatacyjną.

4.1. ETAPY TRANSFORMACJI WARSTWY WIERZCHNIEJ

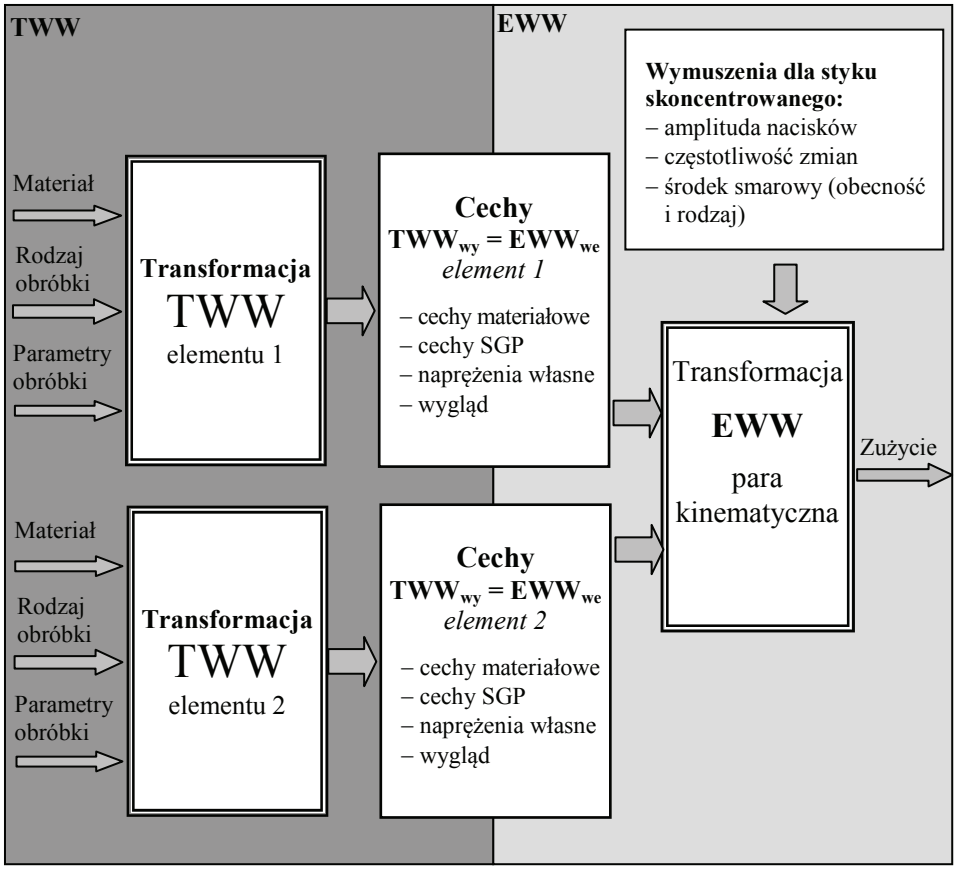
Znajomość stanu technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej umożliwia racjonalne sterowanie procesem użytkowania maszyny. W wyniku tego możliwe jest zwiększenie trwałości maszyny oraz zmniejszenie jej awaryjności.

Technologiczna warstwa wierzchnia zmienia się podczas realizacji poszczególnych zabiegów i operacji przewidzianych w procesie wytwórczym i osiąga pewien stan z chwilą jego zakończenia.

Kolejnym etapem cyklu istnienia wytworu, po wytwarzaniu, jest proces eksploatacji, charakteryzujący się określonymi warunkami wyznaczanymi przez czynniki sterowalne oraz zakłócające (niesterowalne). Podczas eksploatowania maszyny stan WW jej elementów ulega ciągłym zmianom i jest funkcją zarówno warunków eksploatowania, jak i czasu [65]. W odróżnieniu od TWW, dla której istotny jest stan na końcu etapu wytwarzania, dla przebiegu eksploatacji istotny jest bieżący stan WW, będący konsekwencją stanu początkowego. Można przyjąć, że cechy ukształtowanej warstwy są jednocześnie cechami wejściowymi dla rozpoczęcia eksploatacji. Cechy te oznaczono $TWW_{wy} = EWW_{we}$ (rys. 4.1).

Można stwierdzić, że przejście TWW w EWW jest procesem o różnym gradiencie zmian, dlatego proponuje się wprowadzenie dwóch etapów transformacji warstwy wierzchniej. W każdym z nich transformacja zachodzi pod wpływem i w wyniku innych wymuszeń zewnętrznych.

Zamiany zachodzące w technologicznej warstwie wierzchniej (oznaczono jako a) – rys. 4.1) stanowią pierwszy etap. Są one zależne m.in. od rodzaju i parametrów obróbki oraz materiału. Wynikiem końcowym są cechy TWW_{wy}.



Rys. 4.1. Elementy transformacji warstwy wierzchniej par kinematycznych

Analiza literatury pozwoliła na wyznaczenie zbioru najistotniejszych parametrów, jakimi powinna charakteryzować się WW w tej fazie jej istnienia. Omówiono je poniżej według przyjętej hierarchii ważności z podziałem (zgodnie z teorią nauki konstrukcji) na trzy grupy cech konstrukcyjnych [30]:

- tworzywowe (TCK),
- geometryczne (GCK),
- dynamiczne (DCK).

W rozważaniach tribologicznych istotną TCK jest twardość warstwy wierzchniej. Twardość współpracujących elementów ma bezpośredni związek z ich cechami użytkowymi. Jednak jak wykazały badania, znaczenie ma także sposób, w jaki określona twardość została uzyskana, a także parametry obróbki, przy których ją osiągnięto [200].

Kolejną tworzywową cechą konstrukcyjną determinującą cechy TWW jest jej jakość strukturalna, która uwzględnia:
- strukturę (skład chemiczny i związany z nim skład fazowy materiału),
- stopień czystości tworzywa konstrukcyjnego.

Zmienne obciążenia powodują również zmiany strukturalne w eksploatacyjnej warstwie wierzchniej, dlatego też strukturę należy tak dobierać, aby zmiany te były możliwie małe i powodowały jak najmniejsze negatywne skutki w zakresie cech użytkowych WW. Stabilność struktury jest szczególnie istotna przy dużych obciążeniach.

Zagadnieniem bezpośrednio związanym ze strukturą jest stopień czystości tworzywa konstrukcyjnego, rozumiany jako obecność w jego strukturze niepożądanych wtrąceń. Spełniają one rolę podobną do karbów i w przypadku obciążeń zmiennych są przyczyną lokalnych spiętrzeń naprężeń sprzyjających zarodkowaniu mikropęknięć zmęczeniowych.

Z grupy geometrycznych cech konstrukcyjnych, wśród wyjściowych cech technologicznej WW, istotne są wysokościowe parametry chropowatości oraz odchyłki makrogeometrii. Ze względu na różny charakter współpracy elementów istotne jest, aby wartości tych parametrów były możliwie małe. Odchyłki makrogeometrii to czynniki, które determinują wewnętrzne siły dynamiczne. Siły te w dużym stopniu przyczyniają się do zmniejszenia trwałości zmęczeniowej, np. łożysk tocznych.

Poza wymienionymi czynnikami geometrycznymi wpływ mają także: udział nośny i pochylenie profili chropowatości powierzchni oraz kierunkowość struktury. Struktura izotropowa WW (nieuporządkowana), ze względu na warunki sprzyjające powstawaniu filmu smarowego, jest korzystniejsza od struktury anizotropowej.

Można zauważyć, że niektóre parametry opisujące strukturę geometryczną powierzchni są bezpośrednio funkcją innych. Odmienna zależność, lecz także bardzo istotna, występuje między parametrami wysokościowymi chropowatości a kierunkowością struktury [130].

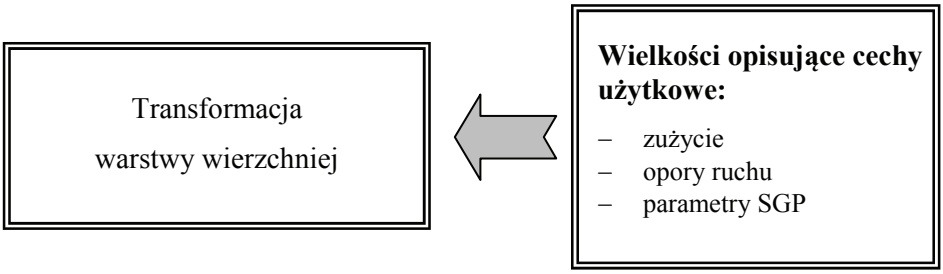
Trzecią grupę czynników determinujących cechy TWW tworzą dynamiczne cechy konstrukcyjne. Ze względów eksploatacyjnych najistotniejsze są naprężenia własne w warstwie wierzchniej powstałe w wyniku operacji technologicznych.

Drugi etap to zmiany zachodzące w eksploatacyjnej warstwie wierzchniej (oznaczone jako b) – rys. 4.1), na które bezpośredni wpływ mają cechy TWW_{wy}, będące jednocześnie cechami EWW_{we}.

Zmiany te zachodzą pod wpływem różnych wymuszeń w zależności od styku par kinematycznych ze sobą współpracujących, które szczegółowo przedstawiono w poprzednich rozdziałach.

Wszystkie przedstawione wyżej czynniki i wielkości mają wpływ na przebieg transformacji warstwy wierzchniej, która decyduje o cechach użytkowych maszyn. Na rysunku 4.2 przedstawiono proponowane wielkości, których miary

można wykorzystać przy ocenie cech użytkowych warstwy wierzchniej współpracujących par kinematycznych.



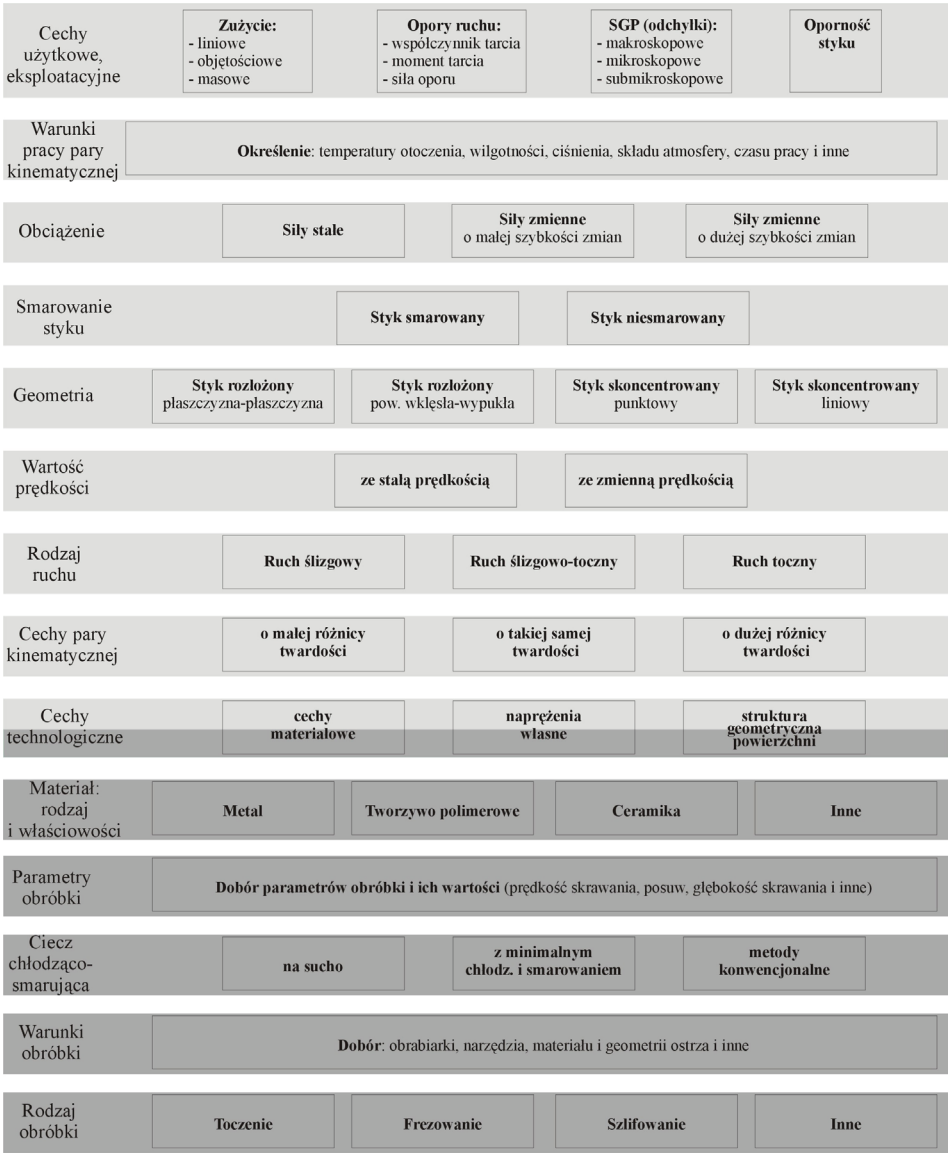
Rys. 4.2. Cechy użytkowe par kinematycznych zdeterminowane transformacją warstwy wierzchniej [111]

Do cech użytkowych współpracujących par kinematycznych zaliczono:
- zużycie (liniowe, objętościowe, masowe),
- opory ruchu (moment tarcia, siła oporu),
- zmiany w strukturze geometrycznej powierzchni,

Tak zdefiniowana transformacja warstwy wierzchniej pozwoliła na przedstawienie algorytmu mającego na celu określenie relacji pomiędzy cechami technologicznymi a cechami użytkowymi współpracujących elementów – rysunek 4.3.

Na przedstawionym algorytmie transformacji nie zawarto wzajemnych powiązań między poszczególnymi grupami. Określenie tych zależności odbywa się indywidualnie dla każdej z rozpatrywanych par kinematycznych.

Podsumowując, należy podkreślić, że stan określany jako TWW jest zarazem stanem początkowym EWW [102]. W takim ujęciu zagadnienia zmiany w warstwie wierzchniej elementów maszyn podczas istnienia wytworu, czyli transformacja technologicznej warstwy wierzchniej w eksploatacyjną stanowi ważny element badań tribologicznych. Przejście od technologicznej do eksploatacyjnej WW odbywa się w sposób zróżnicowany i charakteryzuje się różnym czasem tego przejścia. Występują natomiast, co wykazano, dwa etapy zmian – transformacja technologicznej WW oraz eksploatacyjnej WW, w których na współpracujące powierzchnie oddziałują zbiory różnych wymuszeń (technologicznych i eksploatacyjnych).



Rys. 4.3. Algorytm relacji pomiędzy cechami technologicznymi a cechami użytkowymi współpracujących elementów

Wydzielenie dwóch etapów transformacji jest przydatne przy modelowaniu zmian w warstwie wierzchniej, gdyż na każdym etapie proces ten determinują inne czynniki.

Połączenie otrzymanych analiz pozwoli na poznanie relacji między parametrami opisującymi stan technologicznej a cechami użytkowymi eksploatacyj-

nej warstwy wierzchniej, umożliwi takie projektowanie par kinematycznych, że spełniać one będą zadane funkcje na założonym poziomie.

4.2. OBIEKT BADAŃ

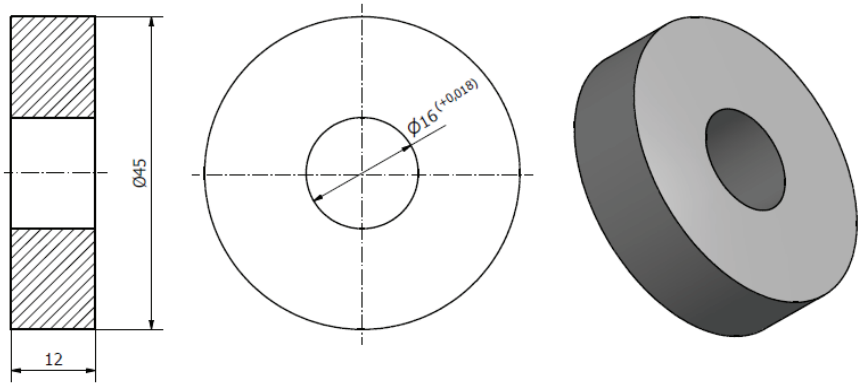
Jako obiekt badań przyjęto walcowe łożyska toczne. Ze względu na charakter obciążenia, kinematykę elementów łożyska i istotę działania takich par kinematycznych w warunkach rzeczywistych, większe zmiany zachodzą na pierścieniu wewnętrznym i dlatego w badaniach obserwowano zmiany zachodzące na tych powierzchniach. Bieżnie łożysk tocznych i elementy toczne wykonuje się głównie ze stali węglowo-chromowych. Zazwyczaj stal ta jest poddawana obróbce cieplnej, w wyniku której uzyskiwana jest twardość w zakresie od 55 do 65 HRC. Ze względu na szerokie stosowanie tego typu stali w łożyskach tocznych walcowych do badań przyjęto próbki wykonane ze stali łożyskowej o oznaczeniu 100Cr6 (dawne ŁH15).

Skład chemiczny zastosowanego materiału przedstawiono w tabeli 4.1. Badania składu chemicznego przeprowadzono na spektrometrze firmy Spectro, model SpectroMaxF.

Tabela 4.1. Skład chemiczny badanej stali

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
zbadano							
1,02	0,43	0,31	0,02	0,02	1,54	0,25	0,26
wg PN-EN ISO 683-17:2004							
0,95-1,1	0,25-0,45	0,15-0,35	≤ 0,027	≤ 0,027	1,3-1,65	≤ 0,3	≤ 0,3

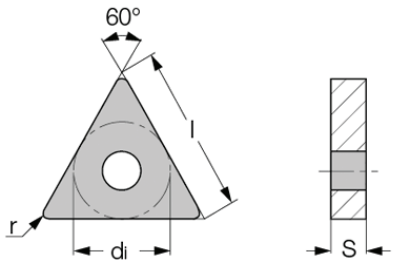
Materiał na próbki dostarczono w postaci pręta okrągłego φ50. Stal poddano obróbce cieplnej (hartowaniu w oleju o temperaturze 820°C), a następnie odpuszczaniu niskiemu (w temperaturze 180°C) w celu osiągnięcia twardości próbek równej 60 HRC. Kształt oraz wymiary próbek (rys. 4.4) dobrano w taki sposób, aby można było przeprowadzić badania dotyczące technologicznej, jak i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej.



Rys. 4.4. Kształt oraz wymiary próbek

4.3. WARUNKI BADAŃ TECHNOLOGICZNYCH

W badaniach technologicznych jako obróbkę wiórową przyjęto obróbkę toczeniem na sucho, którą wykonywano na tokarce TAE-35N, używając do tego celu noży tokarskich z dwustronną, trójkątną płytką ceramiczne przeznaczoną do obróbki stali hartowanej. Płytka o oznaczeniu TNGA 160408T IN22 z powłoką Al_2O_3/TiCN (firmy ISCAR) charakteryzuje się ujemną fazą wzmacniającą na krawędzi skrawającej. Geometrię płytki przedstawiono na rysunku 4.5.



Rys. 4.5. Geometria płytki skrawającej: l = 16,5 mm, di = 9,52 mm, S = 4,76 mm, r = 0,8 mm

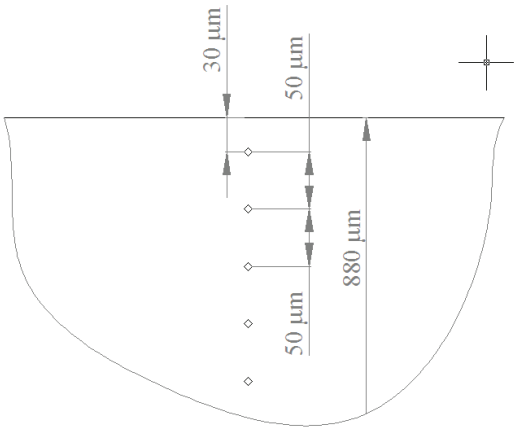
Czynnikami zmiennymi w tej części badań były podstawowe parametry toczenia:

- prędkość skrawania: v, m·min^{-1},
- głębokość skrawania: a_p, mm,
- posuw: f_o, mm·obr.$^{-1}$

Czynnikami wyjściowymi były parametry struktury geometrycznej powierzchni, odpowiednio:

- w badaniach wstępnych w układzie 2D,
- w badaniach zasadniczych w układzie 3D.

Dodatkowo przeprowadzono badania pomocnicze – mikrotwardości. Pomiaru dokonano metodą Vickersa wg normy PN-EN ISO 6507-1:2007 Metale. Pomiar twardości sposobem Vickersa. Cz. 1: Metoda badań, przy użyciu mikrotwardościomierza Hanemanna pod obciążeniem 1 N. Położenie punktów pomiarowych mikrotwardości przedstawiono na rysunku 4.6.



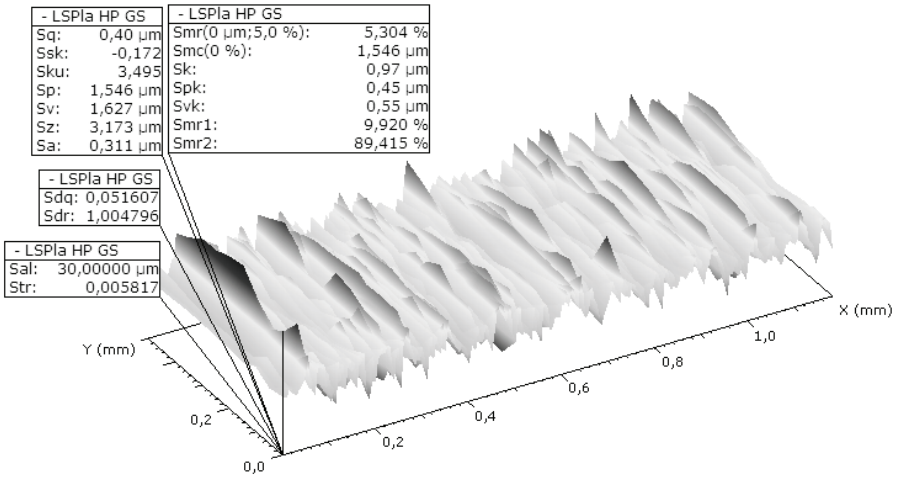
Rys. 4.6. Położenie punktów pomiarowych mikrotwardości

4.4. WARUNKI BADAŃ EKSPLOATACYJNYCH

Badania eksploatacyjne przeprowadzono na maszynie zużyciowej AMSLER A 135 dla skojarzenia – stal-stal. Próbki były te same, co podczas badań technologicznych (toczeniem na sucho). W celach porównawczych badaniom eksploatacyjnym poddano próbki wykonane obróbką ścierną – szlifowaniem.

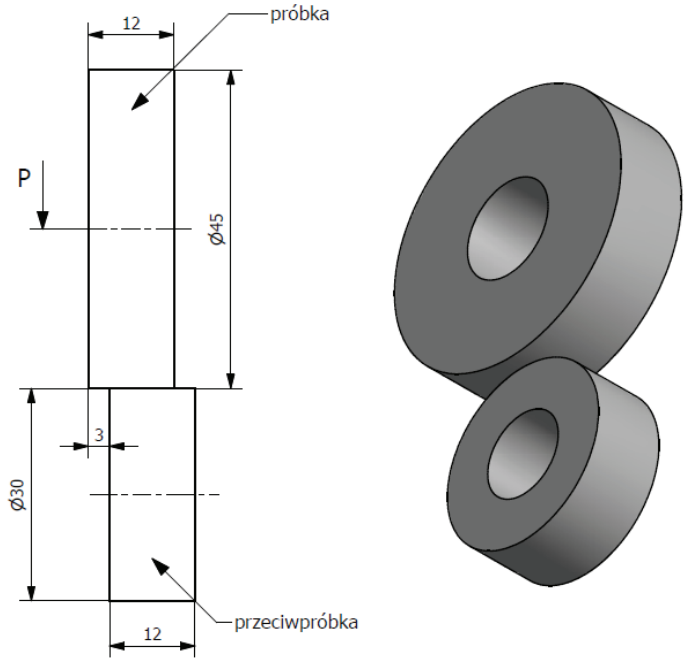
Przeciwpróbkę wykonano obróbką szlifowaniem z tej samej stali 100Cr6, o zwiększonej twardości do 63 HRC. Na rysunku 4.7 przedstawiono przykładowe parametry topografii powierzchni przeciwpróbki.

Szerokość próbki i przeciwpróbki dobrano taką samą. Elementy współpracujące zostały ustawione z 3 mm przesunięciem, w celu jednoczesnego pomiaru struktury geometrycznej powierzchni technologicznej i eksploatacyjnej. Na rysunku 4.8 przedstawiono schemat współpracujących próbek podczas badań eksploatacyjnych. Prędkość obrotową próbki i przeciwpróbki dobrano w taki sposób, aby otrzymać różnicę, która powodowała poślizgi (ruch ślizgowo-toczny) charakterystyczne dla walcowych łożysk tocznych.



Rys. 4.7. Przykładowe parametry topografii powierzchni przeciwpróbki

Smarowania skojarzeń dokonywano na początku próby, po dokładnym oczyszczeniu próbki i przeciwpróbki z wykorzystaniem benzyny ekstrakcyjnej.



Rys. 4.8. Schemat współpracujących próbek podczas badań eksploatacyjnych

Na tak przygotowane powierzchnie naniesiono 3 krople oleju mineralnego L-AN 46 firmy Orlen, stosowanego w tego typu parach kinematycznych. Jest to

mineralny olej maszynowy do smarowania lekko i średnio obciążonych elementów roboczych maszyn i urządzeń przemysłowych.

W trakcie prac badawczych kontrolowano warunki otoczenia (temperaturę i wilgotność względną) tak, aby nie wywierały one wpływu na wyniki badań.

Ten etap badań dotyczył obserwacji zmian zachodzących na powierzchni roboczej próbki w początkowym okresie docierania badanych skojarzeń. Jako obciążenie przyjęto siłę osiową o wartości P = 1,8 kN.

Czynnikami zmiennymi w badaniach eksploatacyjnych były:

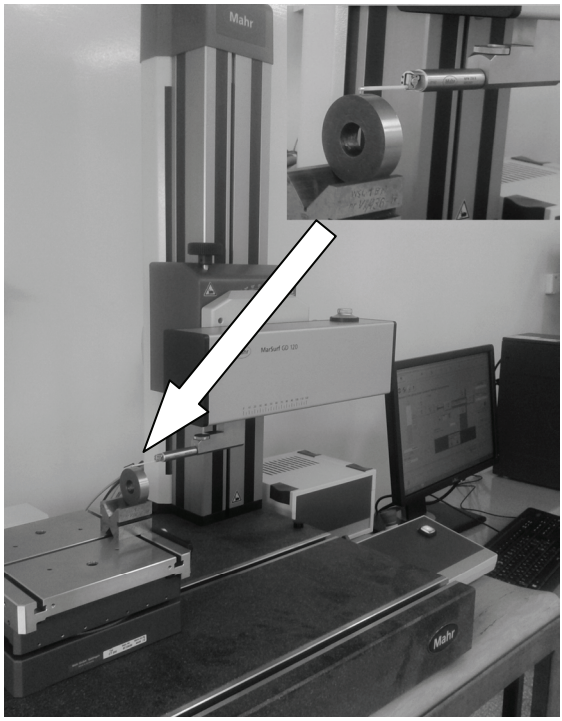
- parametry opisujące strukturę geometryczną powierzchni po obróbce: S_{qT}, μm,
- czas próby badań: τ, s.

Czynnikami wyjściowymi były:

- moment tarcia,
- zużycie liniowe,
- zmiany w strukturze geometrycznej powierzchni.

4.5. APARATURA BADAWCZA

Do pomiaru parametrów struktury geometrycznej powierzchni zarówno w badaniach technologicznych, jak i eksploatacyjnych zastosowano profilagrafometr firmy Mahr (rys. 4.9).

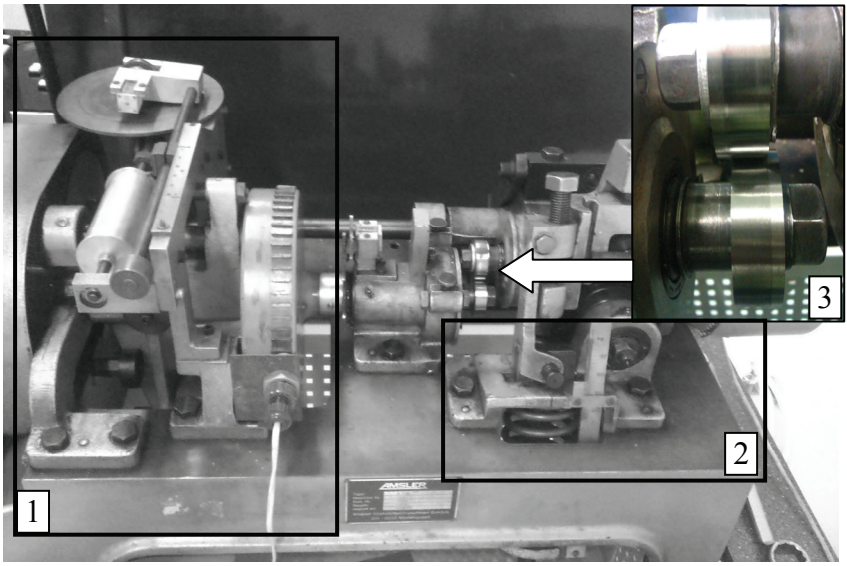


Rys. 4.9. Stanowisko pomiarowe struktury geometrycznej powierzchni firmy Mahr

Do prezentacji wyników badań wykorzystano oprogramowanie MarSurf XT 20 do pomiaru topografii (3D) oraz MarSurf XR 20 do pomiaru profili (2D).

Badania twardości wykonano metodą Vickersa na mikrotwardościomierzu typu Hanemanna firmy Zeiss.

Badania eksploatacyjne przeprowadzono na stanowisku do badań zużyciowych – Amsler A 135, które zawiera trzy główne strefy. Pierwsza dotyczy odczytu momentu tarcia (1), druga odpowiada za zadane obciążenie (2). W środkowej części urządzenia znajduje się strefa współpracującej pary kinematycznej (3). Wymienione powyżej zespoły stanowiska do badań zużyciowych przedstawiono na rysunku 4.10.



Rys. 4.10. Stanowisko do badań zużyciowych – Amsler A 135: 1 – moduł odczytu momentu tarcia, 2 – moduł zadania obciążenia, 3 – współpracująca para kinematyczna

4.6. KSZTAŁTOWANIE TECHNOLOGICZNEJ WARSTWY WIERZCHNIEJ

Badania dotyczące technologicznej warstwy wierzchniej podzielono na dwa etapy. Najpierw dokonano wstępnej analizy wpływu wybranych parametrów obróbki na chropowatość powierzchni mierzoną dwoma podstawowymi parametrami R_a i R_z. Celem tej części badań było określenie zakresu parametrów technologicznych niezbędnych do badań zasadniczych. Drugi etap (badania zasadnicze) dotyczył analizy zmian topografii powierzchni po obróbce. Określono korelacje między czynnikami wejściowymi a parametrami struktury geometrycznej powierzchni w układzie 3D.

4.6.1. Program i zakres badań wstępnych

W badaniach eksperymentalnych (wstępnych) posłużono się planem Hartleya PS/DS (plan statyczny, zdeterminowany, poliselekcyjny) – P: Ha 3(hK) [43,152].

Punkty centralne planu przyjęto na podstawie danych literaturowych oraz badań własnych, w zakresie wartości dla toczenia zarówno zgrubnego, jak i wykończeniowego. Współrzędne miały następujące wartości:

- dla stali: $v = 104$ m·min^{-1}, $a_p = 0{,}3$ mm, $f_o = 0{,}22$ mm·obr.$^{-1}$

Pozostałe punkty wyznaczono zgodnie z zasadami wybranej metody – planu Hartleya. Szczegółowe dane tego planu zawarto w tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Plan badań wstępnych

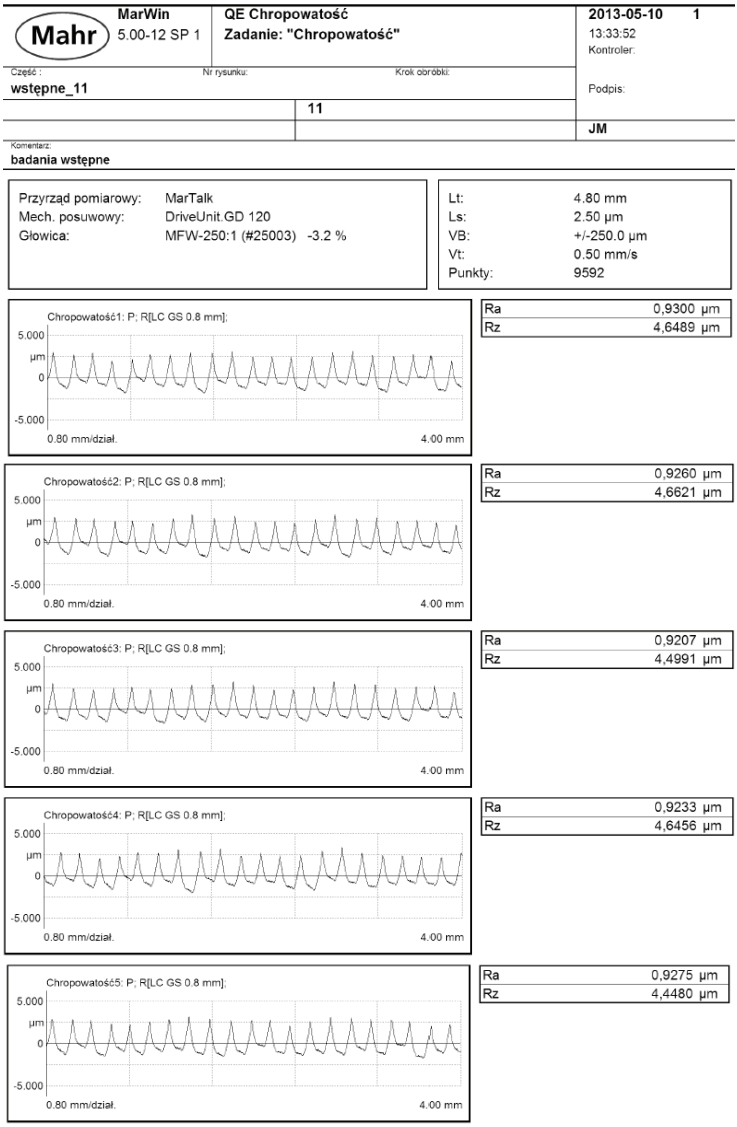
Układ doświadczenia	Czynniki zmienne					
	v	a_p	f_o	v, m·min^{-1}	a_p, mm	f_o, mm·obr.$^{-1}$
1	-1	-1	1	75	0,180	0,285
2	1	-1	-1	133	0,180	0,165
3	-1	1	-1	75	0,420	0,165
4	1	1	1	133	0,420	0,285
5	-1,732	0	0	52	0,300	0,220
6	1,732	0	0	156	0,300	0,220
7	0	-1,732	0	104	0,100	0,220
8	0	1,732	0	104	0,500	0,220
9	0	0	-1,732	104	0,300	0,110
10	0	0	1,732	104	0,300	0,330
11	0	0	0	104	0,300	0,220

Rezultaty obróbki oceniano na podstawie uzyskanej chropowatości. Opierając się na analizie literaturowej, a także danych producentów walcowych łożysk tocznych wybrano dwa parametry opisujące strukturę geometryczną obrobionej powierzchni w układzie 2D:

– średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej – parametr R_a,
– wysokość mikronierówności – parametr R_z.

4.6.2. Wyniki badań wstępnych i ich analiza

Na podstawie przedstawionego powyżej planu badań dokonano pomiaru ustalonych parametrów chropowatości. Przykładowy protokół pomiarowy przedstawiono na rysunku 4.11.



	Ra	Rz
	µm	µm
1:	0.9300	4.6489
2:	0.9260	4.6621
3:	0.9207	4.4991
4:	0.9233	4.6456
5:	0.9275	4.4480
Wartość średnia	0.9255	4.5807
Minimum	0.9207	4.4480
Maksimum	0.9300	4.6621
Zakres	0.0093	0.2141

Rys. 4.11. Przykładowy protokół pomiarowy (dla próbki nr 11)

Otrzymane wyniki badań poddano opracowaniu statystycznemu, określając: wartości średnie, zakres oraz odchylenie standardowe. Cechy statystyczne parametru R_{aT} (indeks T oznacza powierzchnie po obróbce – technologiczną) uzyskane w badaniach wstępnych przedstawiono w tabeli 4.3.

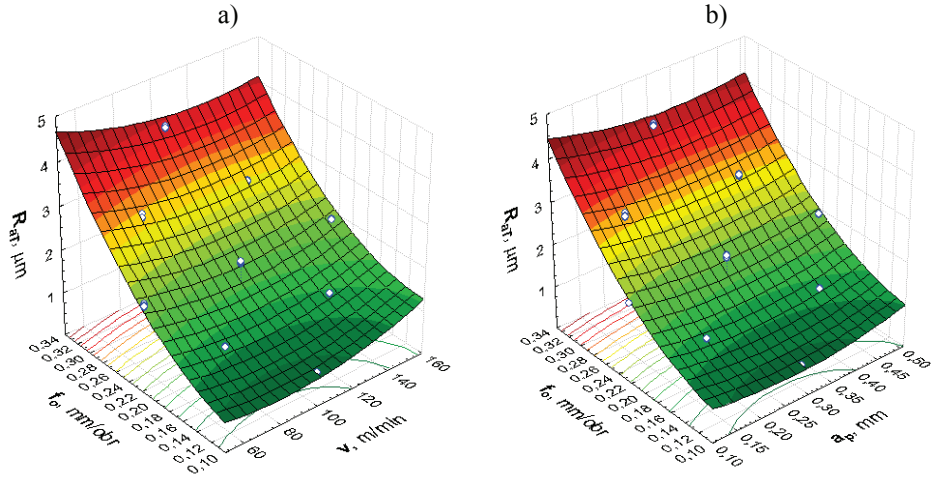
Tabela 4.3. Cechy statystyczne parametru R_{aT} uzyskane w badaniach wstępnych

Układ doświadczenia	**Czynniki zmienne**			R_{aT}		
	v m·min^{-1}	a_p mm	f_o mm·obr.$^{-1}$	średnia	zakres (rozstęp)	odchylenie standardowe
1	75	0,180	0,285	2,8522	0,0677	0,0271
2	133	0,180	0,165	1,2520	0,0204	0,0085
3	75	0,420	0,165	1,1658	0,0298	0,0127
4	133	0,420	0,285	2,6442	0,0304	0,0137
5	52	0,300	0,220	1,9457	0,0412	0,0169
6	156	0,300	0,220	1,9836	0,0113	0,0047
7	104	0,100	0,220	1,9183	0,0157	0,0061
8	104	0,500	0,220	1,9620	0,0200	0,0084
9	104	0,300	0,110	0,5780	0,0194	0,0073
10	104	0,300	0,330	3,9358	0,0390	0,0148
11	104	0,300	0,220	0,9255	0,0093	0,0036

Graficzną postać analizy wyników badań w formie wykresów przestrzennych zaprezentowano na kolejnych rysunkach.

Na rysunku 4.12 przedstawiono zależności parametru chropowatości R_{aT} od parametrów obróbki: głębokości skrawania a_p, prędkości skrawania v i posuwu f_o.

Na podstawie analizy powyższych rysunków stwierdzono, że zwiększenie głębokości skrawania powoduje niewielki wzrost parametru R_{aT} opisującego geometryczną strukturę obrabianej powierzchni, natomiast zwiększanie prędkości skrawania przyczynia się do zmniejszenia tego parametru. Największe zmiany R_{aT} powoduje zmiana wartości posuwu f_o. Nastąpił 6-krotny wzrost wartości chropowatości w badanym przedziale. Analizy te potwierdzają doniesienia literaturowe.



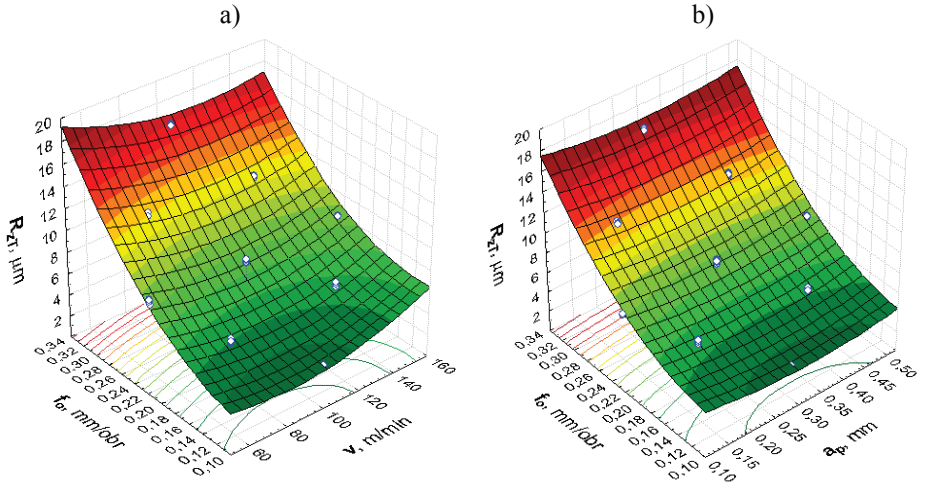
Rys. 4.12. Wykresy zależności parametru chropowatości R_{aT} od: a) posuwu f_o i prędkości skrawania v, b) posuwu f_o i głębokości skrawania a_p

Podobnie jak w powyższej analizie, otrzymane wyniki parametru R_{zT} (rys.4.13) poddano opracowaniu statystycznemu, określając: wartości średnie, zakres oraz odchylenie standardowe. Cechy te, uzyskane w badaniach wstępnych, przedstawiono w tabeli 4.4.

Tabela 4.4. Cechy statystyczne parametru R_{zT} uzyskane w badaniach wstępnych

Układ doświadczenia	**Czynniki zmienne**			R_{zT}		
	v m·min^{-1}	a_p mm	f_o mm·obr.$^{-1}$	średnia	zakres (rozstęp)	odchylenie standardowe
1	75	0,180	0,285	11,7282	0,2311	0,0941
2	133	0,180	0,165	6,0661	0,2611	0,0963
3	75	0,420	0,165	5,2952	0,2020	0,0747
4	133	0,420	0,285	11,1357	0,2191	0,0921
5	52	0,300	0,220	8,3535	0,2215	0,0831
6	156	0,300	0,220	8,4749	0,1546	0,0596
7	104	0,100	0,220	7,9391	0,0935	0,0383
8	104	0,500	0,220	8,2112	0,1378	0,0610
9	104	0,300	0,110	3,1155	0,1733	0,0661
10	104	0,300	0,330	16,1678	0,2211	0,0947
11	104	0,300	0,220	4,5807	0,2141	0,0997

Powierzchnię charakteryzującą się najmniejszą chropowatością otrzymano dla środkowych wartości zakresów badawczych prędkości i głębokości skrawania oraz dla najmniejszych wartości posuwu.

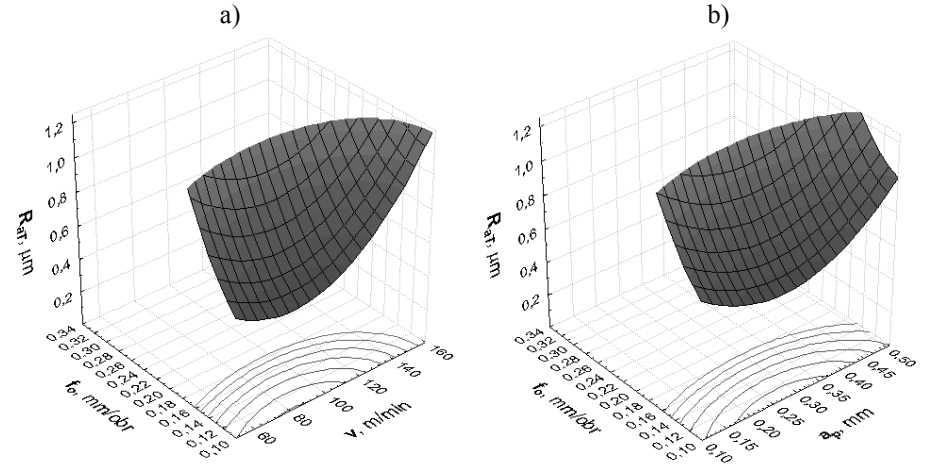


Rys. 4.13. Wykresy zależności parametru chropowatości R_{zT} od: a) posuwu f_o i prędkości skrawania v, b) posuwu f_o i głębokości skrawania a_p

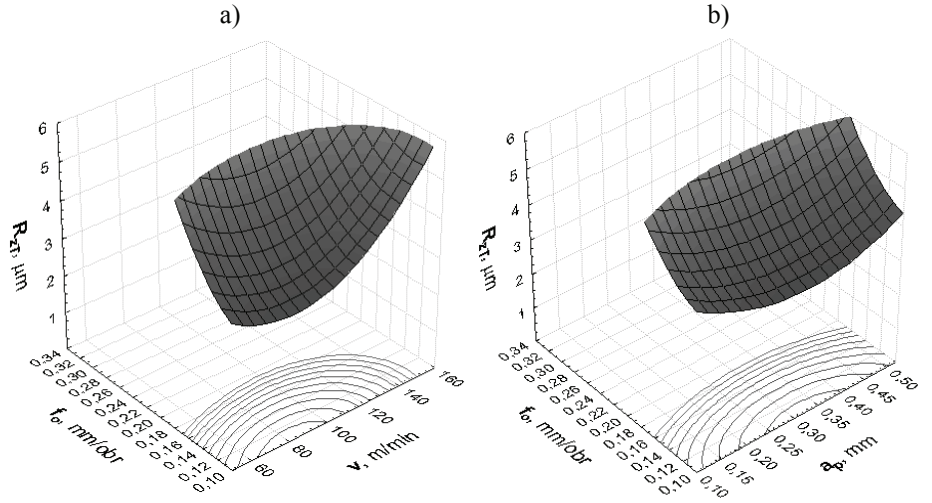
Porównując wyniki badań dwóch parametrów chropowatości można stwierdzić, że w kategoriach jakościowych zarejestrowane zmiany są zbliżone, natomiast – co jest oczywiste – w kategoriach ilościowych są inne.

4.6.3. Podsumowanie i wnioski z badań wstępnych

Na podstawie przeglądu literaturowego i danych producentów walcowych łożysk tocznych określono maksymalne wartości parametrów chropowatości powierzchni bieżni tocznych wynoszące odpowiednio: R_a = 1,25 µm oraz R_z = 6 µm. Dla tak przyjętych wartości maksymalnych przedstawiono w postaci graficznej wartości parametrów toczenia: na rysunku 4.14 – zależności parametru chropowatości R_{aT}, a na rysunku 4.15 – dla parametru R_{zT} dla oczekiwanych maksymalnych wartości od: posuwu f_o i prędkości skrawania v (a) i posuwu f_o i głębokości skrawania a_p (b).



Rys. 4.14. Wykresy zależności parametru chropowatości R_{aT}, dla oczekiwanej maksymalnej wartości, od: a) posuwu f_o i prędkości skrawania v, b) posuwu f_o i głębokości skrawania a_p



Rys. 4.15. Wykresy zależności parametru chropowatości R_{zT}, dla oczekiwanej maksymalnej wartości, od: a) posuwu f_o i prędkości skrawania v, b) posuwu f_o i głębokości skrawania a_p

Przesłanki te pozwoliły ustalić, na podstawie powyższych wykresów warstwicowych, wartości parametrów toczenia na sucho zastosowanych w badaniach zasadniczych.

4.6.4. Badania zasadnicze

Celem badań zasadniczych technologicznej warstwy wierzchniej było określenie sterowalnych parametrów struktury geometrycznej powierzchni w układzie 3D podczas jej kształtowania.

Przejście z profili chropowatości na topografię powierzchni tworzy nowe możliwości badawcze. Pozwala poddawać analizie elementy wpływające na właściwości funkcjonalne powierzchni.

Przeprowadzone badania własne pozwoliły na wyznaczenie zależności matematycznych, dotyczących relacji między parametrami obróbki wiórowej a strukturą geometryczną powierzchni.

4.6.4.1. Topografia powierzchni technologicznej warstwy wierzchniej

Analiza topografii powierzchni przedstawiona poniżej dotyczy ukształtowania powierzchni powstałej w wyniku toczenia na sucho.

W badaniach zasadniczych zastosowano plan badań statystyczny zdeterminowany kompletny PS/DK, różnowartościowy [43]. Przyjęto plan trójwartościowy, ustalając na podstawie badań wstępnych zakresy wartości zmiennych wejściowych, odpowiednio:

- prędkość skrawania: $v = 100 \div 160$ m·min^{-1},
- głębokość skrawania: $a_p = 0{,}1 \div 0{,}3$ mm,
- posuw: $f_o = 0{,}06 \div 0{,}18$ mm·obr.$^{-1}$.

Przyjęto plan różnowartościowy, tzn. liczba wartości poszczególnych badanych wielkości nie była jednakowa ze względu na spodziewany, oszacowany na podstawie wiedzy i badań wstępnych wpływ danego czynnika. Dla prędkości i głębokości skrawania przyjęto po trzy wartości odpowiednio: $v = 100$ m·min^{-1}, 130 m·min^{-1}, 160 m·min^{-1}, $a_p = 0{,}1$ mm, 0,2 mm, 0,3 mm, a dla posuwu przyjęto pięć wartości: f_o = 0,06 mm·obr.$^{-1}$, 0,09 mm·obr.$^{-1}$, 0,12 mm·obr.$^{-1}$, 0,15 mm·obr.$^{-1}$, 0,18 mm·obr.$^{-1}$. Tak przyjęty plan charakteryzuje się liczbą pomiarów dla każdego z czynników wynikowych równą 45 (nie licząc powtórzeń).

W badaniach wstępnych wykorzystano parametry SGP w układzie 2D (uzyskane na podstawie profili nierówności). Wielkości wyjściowe przyjęte w badaniach zasadniczych opisują topografię powierzchni i przedstawione są w układzie 3D.

Parametry zastosowane w tych badaniach można podzielić na odpowiednie grupy:

parametry amplitudowe:

S_a – średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych powierzchni, μm,
S_q – średnie kwadratowe odchylenie rzędnych powierzchni, μm,
S_p – wysokość najwyższego wzniesienia powierzchni, μm,
S_v – głębokość najniższego wgłębienia powierzchni, μm;
S_{sk} – współczynnik asymetrii powierzchni (skośności),

S_{ku} – współczynnik nachylenia powierzchni (skupienia),
S_z – wysokość nierówności wg 10 punktów, µm;

parametry hybrydowe:

S_{dq} – średnie kwadratowe pochylenie nierówności,
S_{dr} – rozwinięcie powierzchni;

parametry objętościowe:

S_{mr} – względny udział materiałowy, %,
S_{mc} – udział materiałowy powierzchni, µm;

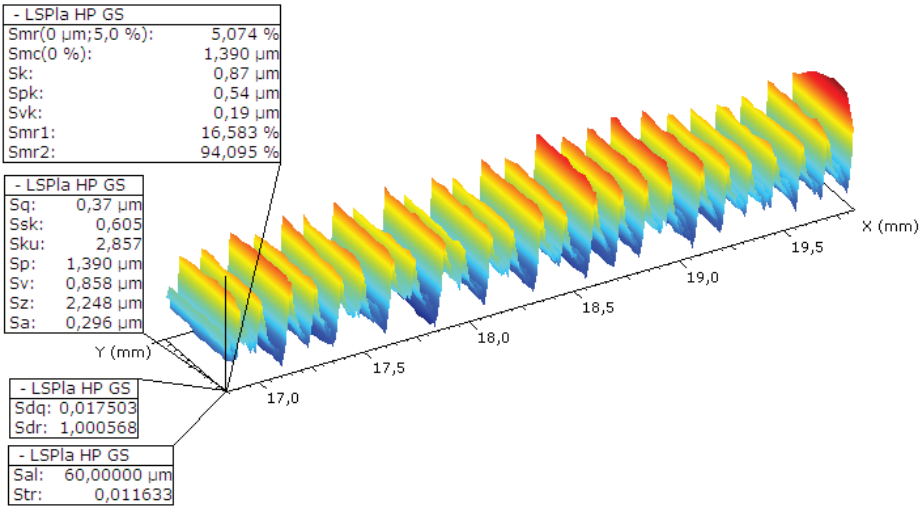
parametry przestrzenne:

S_{al} – długość odcinka najszybszego zanikania funkcji autokorelacji, µm,
S_{tr} – wysokość tekstury powierzchni;

parametry krzywej nośności:

S_k – wysokość chropowatości rdzenia, µm,
S_{pk} – zredukowana wysokość wzniesień, µm,
S_{vk} – zredukowana wysokość wgłębień, µm,
S_{mr1} – udział nośny wierzchołków, %,
S_{mr2} – udział nośny wgłębień, %.

Dokonano pomiarów wszystkich przedstawionych powyżej parametrów. Przykładowe wyniki badań przedstawiono na rysunku 4.16.



Rys. 4.16. Topografia powierzchni i uzyskane wartości jej parametrów

Określono cechy statystyczne otrzymanych wyników, tj.:
- średnią arytmetyczną, będącą miarą tendencji centralnej,
- odchylenie standardowe i współczynnik zmienności – miara zmienności,
- wartości minimalne i maksymalne.

Uwzględniając dużą liczbę czynników, przeprowadzono selekcję polegającą na analizie korelacji między poszczególnymi parametrami topografii a posuwem oraz prędkością i głębokością skrawania. Zastosowano współczynnik korelacji liniowej Pearsona – r_{XY}. Określa on stopień wzajemnej proporcjonalności wartości zmiennych. Wartość tego współczynnika zawiera się od 0 (zmienne nie są skorelowane) do 1 (korelacja prawie pełna).

Wartość współczynników korelacji między parametrami SGP a parametrami toczenia na sucho przedstawiono w tabeli 4.5.

Tabela 4.5. Wartości współczynników korelacji między parametrami SGP a parametrami obróbki

Parametry SGP		**Parametry obróbki**		
		v	a_p	f_o
amplitudowe	S_a	0,0941	-0,0388	0,8886
	S_q	0,1059	-0,0211	0,8892
	S_p	0,1852	0,0222	0,8555
	S_v	0,1993	0,0566	0,5601
	S_{sk}	0,1149	0,1138	0,8649
	S_{ku}	0,3212	0,2537	0,4847
	S_z	0,1968	0,0295	0,8424
hybrydowe	S_{dq}	-0,0679	0,1240	0,3159
	S_{dr}	-0,0685	0,1434	0,2898
objętościowe	S_{mr}	0,4125	-0,2301	-0,3144
	S_{mc}	0,1837	0,0373	0,8519
przestrzenne	S_{al}	0,0617	0,0448	0,3287
	S_{tr}	0,0617	0,0448	0,3287
krzywej nośności	S_k	0,0707	-0,0869	0,5471
	S_{pk}	0,0974	0,0114	0,8849
	S_{vk}	0,2643	0,0625	-0,3621
	S_{mr1}	0,1147	0,0293	0,9060
	S_{mr2}	0,0024	-0,0945	0,7382

Na podstawie analizy powyższej tabeli do zbioru niezbędnych do opisu struktury geometrycznej badanych powierzchni wybrano parametry charaktery-

zujące się największą wartością współczynnika korelacji w swoich grupach. Do tego zbioru zaliczono:

- parametr amplitudowy S_q,
- parametr hybrydowy S_{dq},
- parametr przestrzenny S_{tr},
- parametr krzywej nośności S_k.

Ze względu na to, że badane powierzchnie dotyczą łożysk tocznych, a parametr S_q jest parametrem uśrednionym i na pojedyncze zmiany w SGP reaguje w znacznie mniejszym stopniu niż parametry S_p czy S_v, dodatkowo do powyżej zaprezentowanego zbioru dołączono parametr S_p – wysokość najwyższego wzniesienia powierzchni. Parametr ten pozwala uzyskać informację odnośnie funkcjonalności powierzchni.

Do powyższego zbioru nie wybrano parametrów z grupy objętościowej, ponieważ zostały one zawarte w analizie dotyczącej udziału materiałowego.

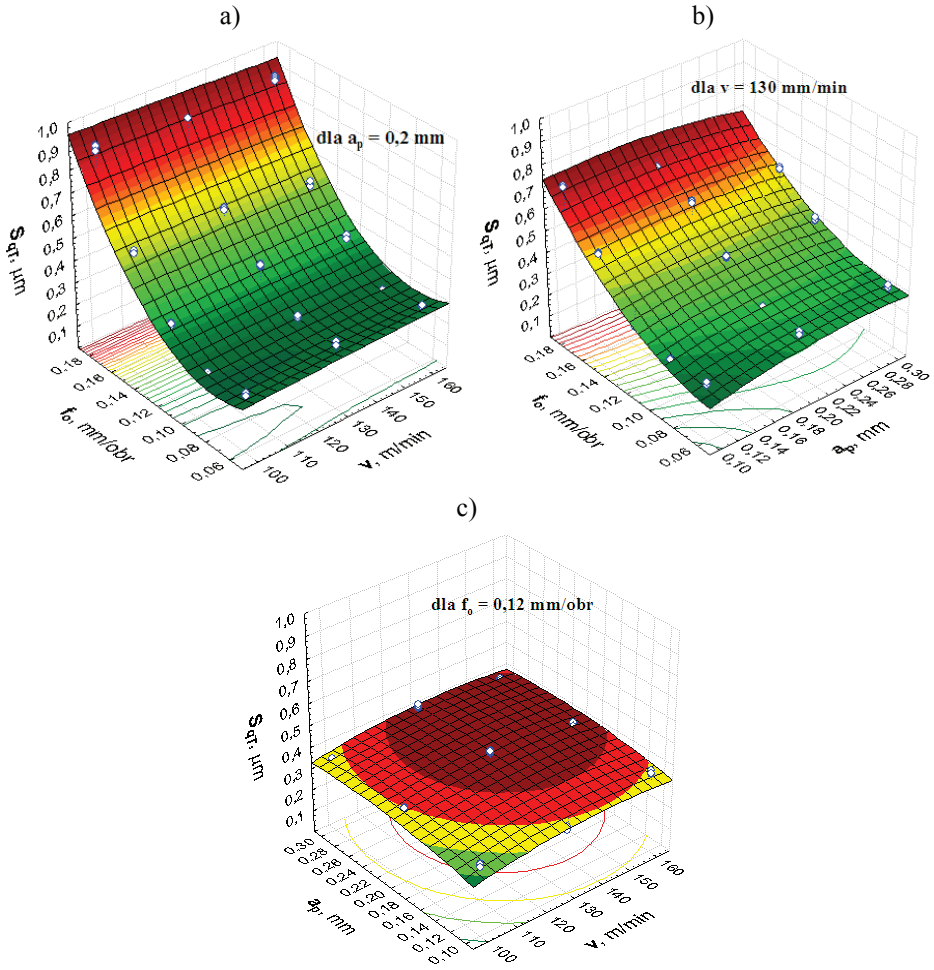
Graficzną postać analizy wyników badań dotyczących struktury geometrycznej technologicznej warstwy wierzchniej powstałej w wyniku toczenia na sucho w formie wykresów przestrzennych przedstawiono na kolejnych rysunkach.

Parametry amplitudowe

Zastosowano w badaniach parametr S_q, zamiast często spotykanego parametru S_a. Podyktowane to zostało (pomijając wartość współczynnika korelacji) większym wpływem pojedynczych wysokości i wgłębień topografii na jego wartość niż na S_a. Jest to parametr stosowany w badaniach naukowych, mający większe znaczenie statystyczne.

Otrzymane zależności parametru topografii powierzchni S_{qT} od posuwu, prędkości i głębokości skrawania dla poszczególnych punktów centralnych przedstawiono na rysunku 4.17. Badania te potwierdziły doniesienia literaturowe wskazujące na to, że największy wpływ na zmianę chropowatości powierzchni podczas toczenia na sucho ma posuw. Otrzymana zależność graficzna (rys. 4.17a), ma charakter degresywno-progresywny. W początkowej fazie wzrostu wartości posuwu (do 0,09 mm·obr.$^{-1}$) wartość S_{qT} maleje, a następnie wzrasta.

Na podstawie analizy poniższego rysunku stwierdzono, że zmiana wartości głębokości i prędkości skrawania ma niewielki wpływ na wartość parametru S_{qT}. Najlepiej obrazuje to rysunek (c), gdzie najmniejsze wartości badanego parametru chropowatości otrzymywane są w początkowych zakresach tych zmiennych wejściowych.



Rys. 4.17. Wykresy zależności parametru topografii powierzchni S_{qT} od: a) posuwu f_o i prędkości skrawania v, b) posuwu f_o i głębokości skrawania a_p, c) głębokości skrawania a_p i prędkości skrawania v

W celu wyznaczenia zależności parametru chropowatości technologicznej warstwy wierzchniej S_{qT} od parametrów obróbki estymowano współczynniki regresji. W tabeli 4.6 przedstawiono wartość tych współczynników i ich istotności dla modelu potęgowego.

Tabela 4.6. Współczynniki regresji i ich istotność funkcji $S_{qT} = f(v, a_p, f_o)$

	b_0	b_1 (v)	b_2 (a_p)	b_3 (f_o)
b_i	1,973	-0,144	0,067	0,101
t-Stat	0,6642	0,7082	0,7497	9,9840
p-value	0,5103	0,4828	0,4577	0,0001

Równanie z uwzględnieniem danych z tabeli 4.6 ma postać:

$$S_{qT} = 1{,}973 \cdot v^{-0{,}144} \cdot a_p^{0{,}067} \cdot f_o^{0{,}101}, \mu\text{m} \tag{4.1}$$

a wartości statystyk wynoszą:

- współczynnik korelacji wielorakiej R = 0,8431
- współczynnik determinacji $R^2 = 0{,}7107$
- błąd standardowy s = 0,2625
- istotność modelu:

$F_{obl} = 33{,}5815$
p-value = 0,0001

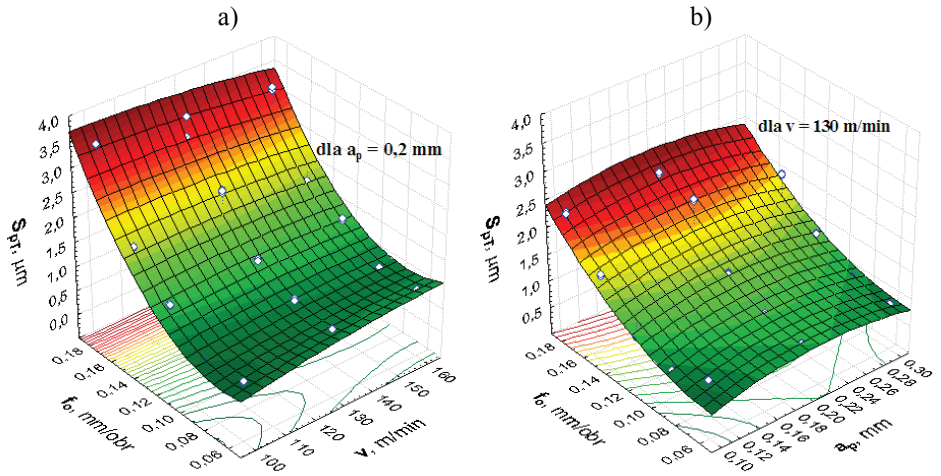
Wartości statystyk przedstawionych powyżej wskazują, że równanie potęgowe (4.1) charakteryzuje się dużymi współczynnikami: korelacji i determinacji, a wartość błędu standardowego jest mała. Świadczy to o istotności i adekwatności przyjętej zależności.

Drugim z parametrów amplitudowych analizowanych w badaniach zasadniczych była wysokość najwyższego wzniesienia powierzchni S_p. Parametr ten pozwala na uzyskanie informacji odnośnie funkcjonalności powierzchni. Zaleca się stosować go do powierzchni roboczych łożysk tocznych, które stanowią odzwierciedlenie praktycznych zastosowań niniejszych badań.

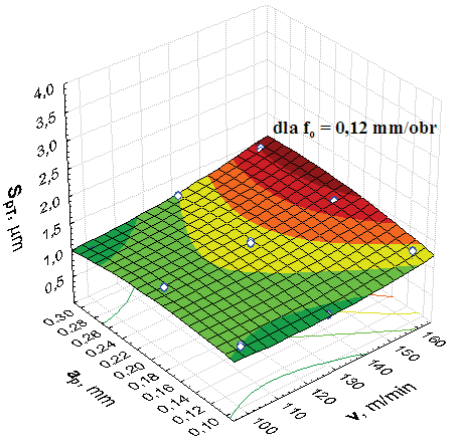
Na rysunku 4.18 przedstawiono zależności parametru topografii powierzchni S_{pT} od posuwu f_o, prędkości v i głębokości skrawania a_p.

Charakter otrzymanych wykresów powierzchniowych jest podobny jak w przypadku analizy poprzedniego parametru amplitudowego S_{qT}. Jest to spowodowane silną korelacją między tymi parametrami.

Analizie matematycznej poddano wyniki badań doświadczalnych dotyczące zmian wartości parametru S_{pT}. W tabeli 4.7 przedstawiono współczynniki regresji i ich istotności dla funkcji $S_{pT} = f(v, a_p, f_o)$.



c)



Rys. 4.18. Wykresy zależności parametru topografii powierzchni S_{pT} od: a) posuwu f_o i prędkości skrawania v, b) posuwu f_o i głębokości skrawania a_p, c) głębokości skrawania a_p i prędkości skrawania v

Tabela 4.7. Współczynniki regresji i ich istotność funkcji $S_{pT} = f(v, a_p, f_o)$

	b_0	b_1 (v)	b_2 (a_p)	b_3 (f_o)
b_i	1,954	0,461	0,120	1,106
t-Stat	0,5487	1,8972	1,1630	9,1826
p-value	0,5862	0,0649	0,2516	0,0000

Model zaobserwowanych zmian, z uwzględnieniem współczynników regresji z tabeli 4.7, ma postać:

$$S_{pT} = 1{,}954 \cdot v^{0{,}461} \cdot a_p^{0{,}120} \cdot f_o^{1{,}106}, \ \mu\text{m} \tag{4.2}$$

a wartości statystyk wynoszą:
- współczynnik korelacji wielorakiej $R = 0{,}8278$
- współczynnik determinacji $R^2 = 0{,}6853$
- błąd standardowy $s = 0{,}3134$
- istotność modelu:

$F_{obl} = 29{,}7576$
p-value = 0,0001

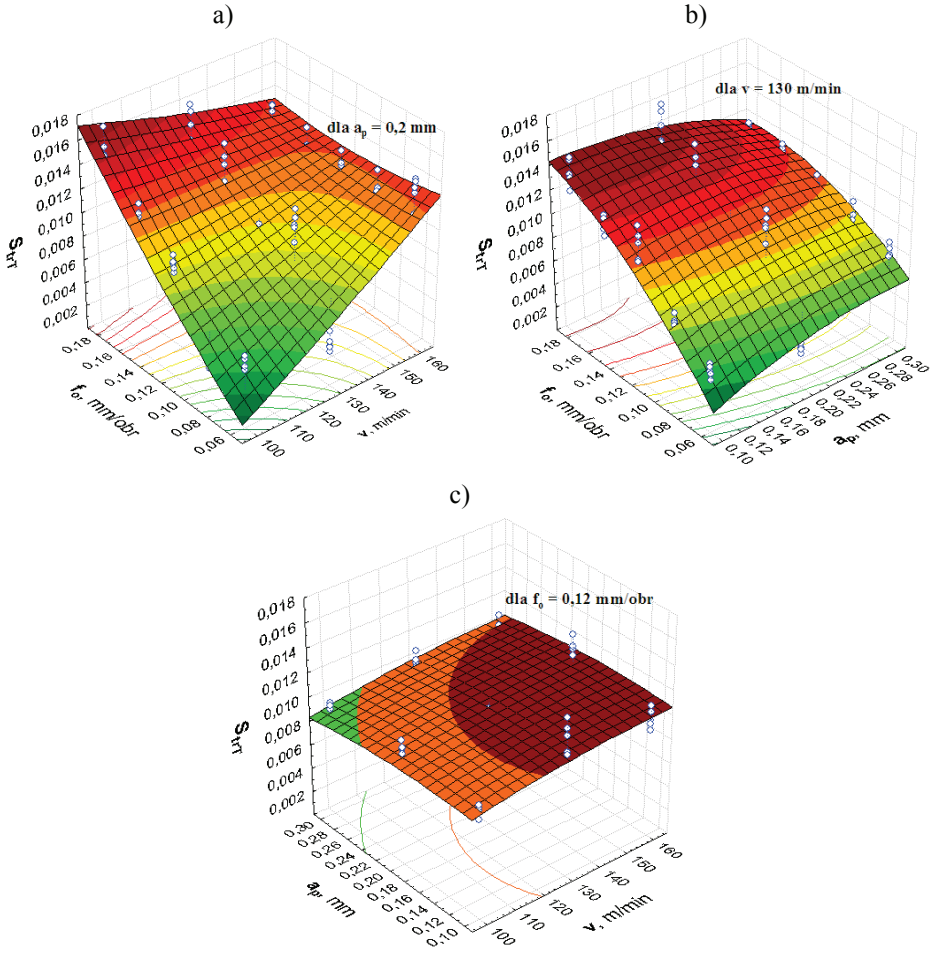
Wartości powyższe świadczą o tym, że zależność (4.2) jest adekwatna i istotna. Tylko jeden ze współczynników, dla głębokości skrawania, jest nieistotny.

Z powyższych analiz wynika, że zmiana wartości parametrów amplitudowych w dużym stopniu zależy od parametrów obróbki.

Parametr przestrzenny

Parametr przestrzenny S_{trT}, zaliczany do parametrów poziomych, nie wykazuje znaczącej korelacji z czynnikami wejściowymi w badaniach własnych. Jest on zależny od ukształtowania geometrycznego powierzchni, a jego wartość wynika z funkcji autokorelacji.

Na rysunku 4.19 przedstawiono zależności parametru przestrzennego S_{trT} posuwu f_o, prędkości v i głębokości skrawania a_p. Wzrost wartości każdego z czynników wejściowych powoduje wzrost wartości parametru przestrzennego. Tylko dla górnego zakresu posuwu następuje niewielkie obniżenie wartości chropowatości opisanej badanym parametrem.



Rys. 4.19. Wykresy zależności parametru poziomego S_{trT} od: a) posuwu f_o i prędkości skrawania v, b) posuwu f_o i głębokości skrawania a_p, c) głębokości skrawania a_p i prędkości skrawania v

W tabeli 4.8 przedstawiono współczynniki oraz i ich istotność, będące podstawowymi składowymi równania (4.3).

Tabela 4.8. Współczynniki regresji i ich istotność funkcji $S_{trT} = f(v, a_p, f_o)$

	b_0	b_1 (v)	b_2 (a_p)	b_3 (f_o)
b_i	0,007	0,275	0,065	0,387
t-Stat	-3,5515	0,9951	0,5538	2,8235
p-value	0,0010	0,3255	0,5827	0,0073

$$S_{trT} = 0{,}007 \cdot v^{0{,}275} \cdot a_p^{0{,}065} \cdot f_o^{0{,}387}, \text{ µm} \qquad (4.3)$$

a wartości statystyk wynoszą:
- współczynnik korelacji wielorakiej $R = 0{,}4294$
- współczynnik determinacji $R^2 = 0{,}1844$
- błąd standardowy $s = 0{,}3565$
- istotność modelu:

$F_{obl} = 3{,}0896$
p-value = 0,0374

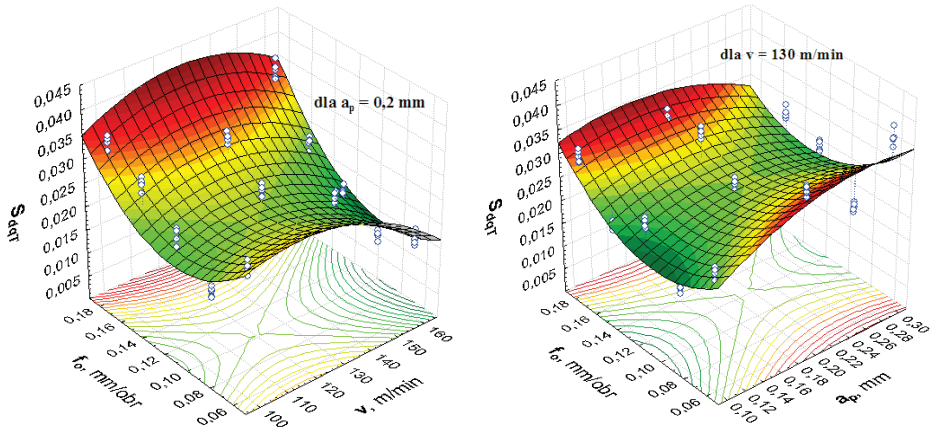
Wartość F_{obl} modelu ($F_{obl} < 4$) świadczy o braku adekwatności zależności do badań empirycznych. Jest to model istotny ($F_{obl} > 1$), ale nieadekwatny.

Parametr hybrydowy

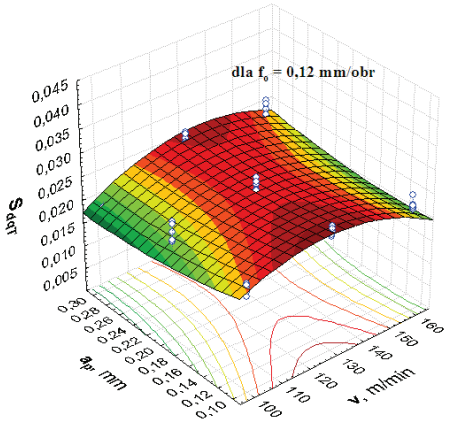
Następnym z parametrów badanych jest parametr S_{dq}. Wykazuje dużą czułość na wartości ekstremalne miejscowych wzniosów powierzchni. Użyteczny jest przy wykrywaniu zmian geometrii profilu przed i po zużyciu. Parametry z tej grupy wykazują ścisłą korelację z parametrami amplitudowymi.

Graficzną interpretację otrzymanych wyników badań przedstawiono na rysunku 4.20.

a) b)



c)



Rys. 4.20. Wykresy zależności parametru hybrydowego S_{dqT} od: a) posuwu f_o i prędkości skrawania v, b) posuwu f_o i głębokości skrawania a_p, c) głębokości skrawania a_p i prędkości skrawania v

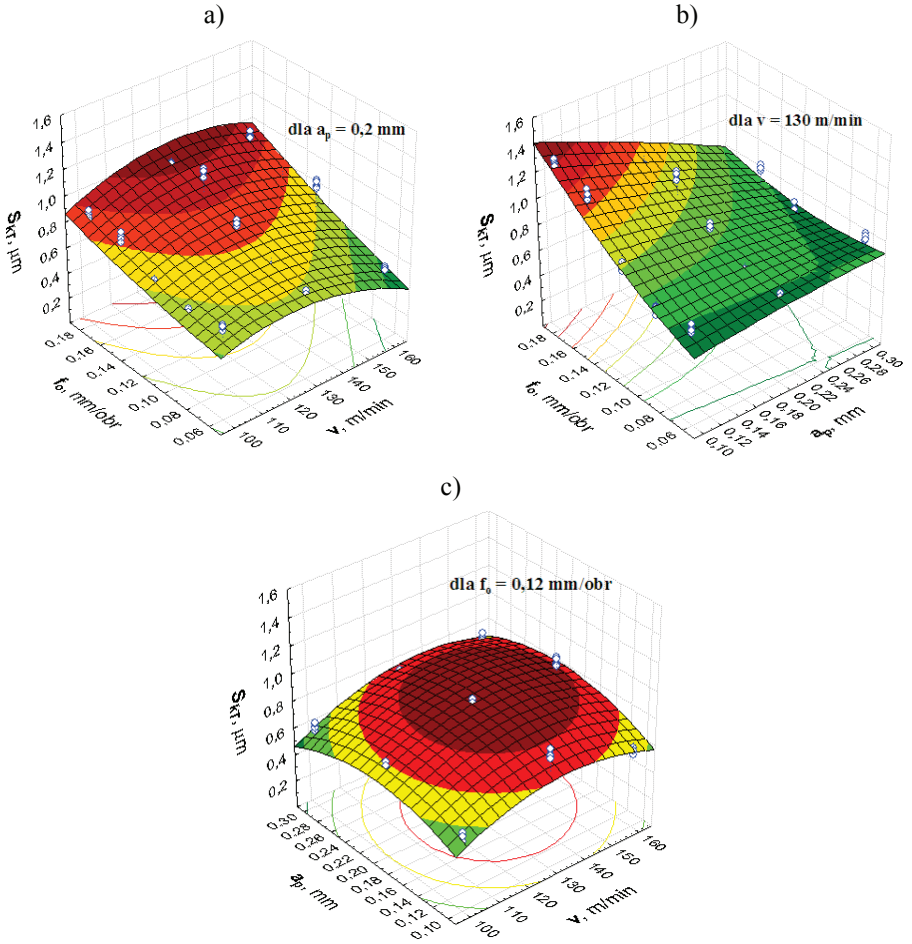
Najmniejsze wartości tego parametru obserwuje się dla posuwu w przedziale wartości od 0,10 do 0,12 mm·obr.$^{-1}$. Oznacza to otrzymanie powierzchni o największych zaokrągleniach wierzchołków nierówności.

Ze względu na małą korelację tego parametru z parametrami obróbki nie analizowano równań regresji.

Parametr krzywej nośności

Parametr S_k stanowi miarę efektywnej głębokości chropowatości, bez wyróżniających się wzniesień i wgłębień. Wraz ze wzrostem posuwu i głębokości skrawania wartość parametru S_{kT} rośnie, co jest zjawiskiem niekorzystnym dla powierzchni roboczych walcowych łożysk tocznych (rys. 4.21).

Zmiana prędkości skrawania w początkowym okresie powoduje wzrost parametru krzywej nośności, a następnie po przekroczeniu punktu centralnego (v = 130 m·min^{-1}) jego obniżenie.



Rys. 4.21. Wykresy zależności parametru krzywej nośności S_{kT} od: a) posuwu f_o i prędkości skrawania v, b) posuwu f_o i głębokości skrawania a_p, c) głębokości skrawania a_p i prędkości skrawania v

Opracowaniu statystycznemu poddano również zależności parametru S_{kT} od czynników technologicznych. W tabeli 4.9 zawarto współczynniki i ich istotność, niezbędne do określenia zależności matematycznych (4.4).

Tabela 4.9. Współczynniki regresji i ich istotność funkcji $S_{kT} = f(v, a_p, f_o)$

	b_0	b_1 (v)	b_2 (a_p)	b_3 (f_o)
b_i	0,647	0,162	0,029	0,295
t-Stat	-0,5166	0,9697	0,4153	3,5499
p-value	0,6082	0,3379	0,6801	0,0010

Zależność ma postać:

$$S_{kT} = 0{,}647 \cdot v^{0{,}162} \cdot a_p^{0{,}029} \cdot f_o^{0{,}295}, \text{ µm} \tag{4.4}$$

a wartości statystyk wynoszą:
- współczynnik korelacji wielorakiej $R = 0{,}5007$
- współczynnik determinacji $R^2 = 0{,}2507$
- błąd standardowy $s = 0{,}2161$
- istotność modelu:

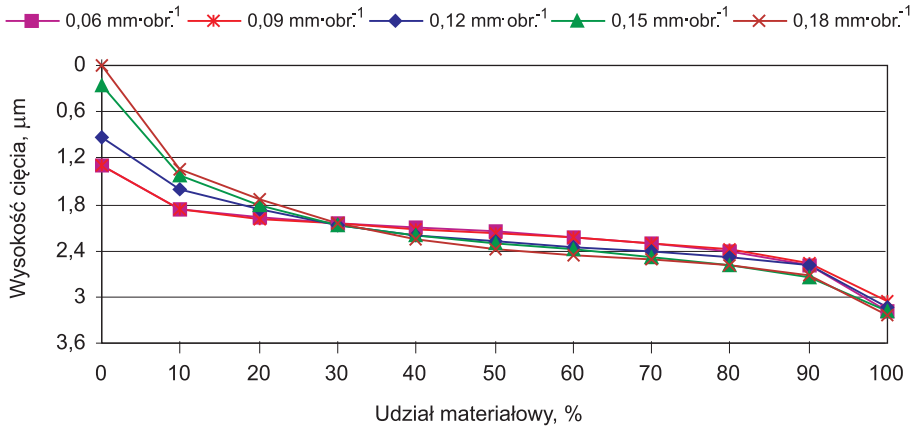
  $F_{obl} = 4{,}5716$

  p-value = 0,0075

4.6.4.2. Udział materiałowy topografii powierzchni

Badania udziału materiałowego są ważnym elementem dla powierzchni, których przeznaczeniem jest współpraca w kontakcie ruchowym. Należą do nich powierzchnie elementów walcowych łożysk tocznych. Krzywa udziału materiałowego nazywana też wykresem Abbotta-Firestone'a opisuje rozkład materiału dla powierzchni w zależności od głębokości przekroju. Dostarcza informacji o wertykalnych zmianach topografii, a więc dotyczących cech istotnych dla funkcji użytkowych powierzchni.

Analizie poddano wpływ czynników wejściowych na charakter krzywych udziału materiałowego. Na rysunku 4.22 przedstawiono wpływ posuwu na kształt krzywej udziału materiałowego topografii powierzchni dla pozostałych parametrów obróbki: $v = 130$ m·min^{-1}, $a_p = 0{,}2$ mm.

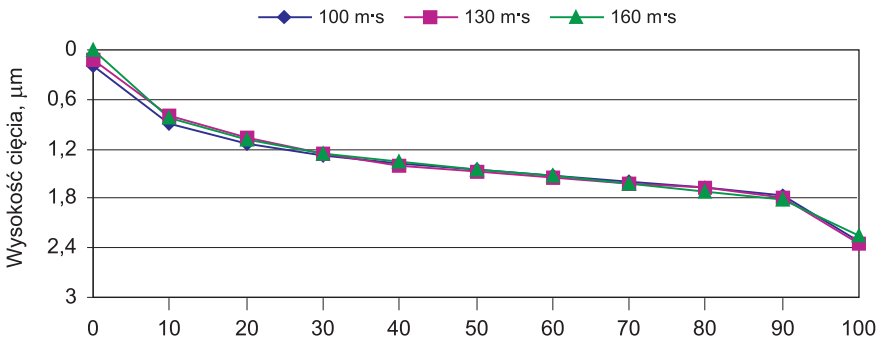


Rys. 4.22. Wpływ wartości posuwu na kształt krzywej udziału materiałowego topografii powierzchni ($v = 130$ m·min^{-1}, $a_p = 0{,}2$ mm)

Na powyższym wykresie wyraźnie widać zmiany spowodowane zwiększaniem wartości posuwu. Dotyczą one przede wszystkim wierzchołków, które podczas eksploatacji mogą powodować zwiększenie tarcia, a w konsekwencji

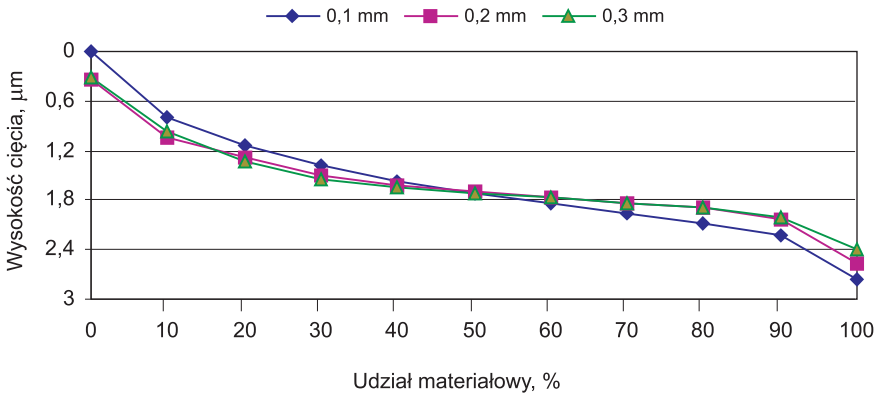
idzie szybsze zużycie. Powierzchnie z największym udziałem materiałowym otrzymano dla posuwu f_o = 0,06 mm·obr.$^{-1}$ i 0,09 mm·obr.$^{-1}$. Powierzchnie te charakteryzują się dużą odpornością na zużycie ścierne. Świadczy o tym niewielkie pochylenie krzywej udziału materiałowego. Powierzchnia tego typu cechuje się dużą nośnością, małym tarciem oraz odpornością na zacieranie – ma więc cechy pożądane dla powierzchni roboczych łożysk tocznych. Zwiększanie wartości posuwu powoduje pogarszanie się właściwości odpornościowych badanych powierzchni.

Wyniki pomiarów udziału materiałowego topografii powierzchni dla toczenia na sucho dla różnych wartości prędkości skrawania przedstawiono na rysunku 4.23. Zmiana tego czynnika wejściowego w badanym zakresie nie wpływa znacząco na kształt krzywej udziału materiałowego.



Rys. 4.23. Wpływ wartości prędkości skrawania na kształt krzywej udziału materiałowego topografii powierzchni (a_p = 0,2 mm, f_o = 0,12 mm·obr.$^{-1}$)

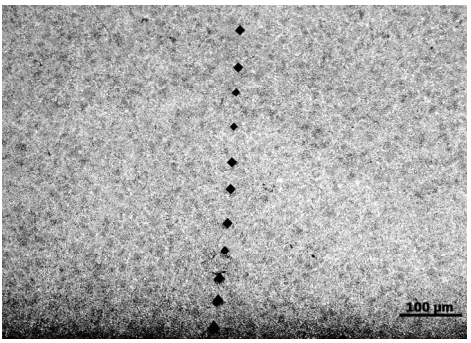
Niewielki wpływ na zmiany krzywej udziału materiałowego ma również ostatni z parametrów skrawania – głębokość. Zależność tę dla różnej jej wartości przedstawiono na rysunku 4.24.



Rys. 4.24. Wpływ wartości głębokości skrawania na kształt krzywej udziału materiałowego topografii powierzchni (v = 130 m·min^{-1}, f_o = 0,12 mm·obr.$^{-1}$)

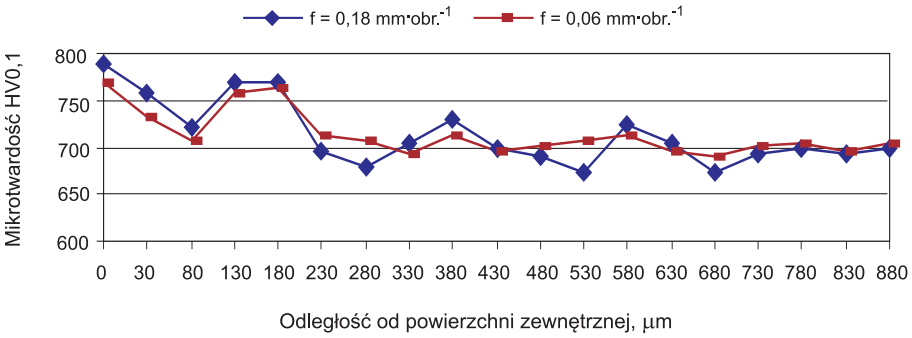
4.6.5. Badania pomocnicze – wpływ parametru obróbki na mikrotwardość warstwy wierzchniej

Ważnym parametrem określającym właściwości warstwy wierzchniej jest jej twardość. Na podstawie danych literaturowych stwierdzono, że największy wpływ na mikrotwardość, w zakresie prowadzonych badań zasadniczych, ma posuw. Dokonano analizy wpływ tego parametru technologicznego na mikrotwardość przeprowadzoną metodą Vickersa. Na rysunku 4.25 przedstawiono punkty pomiarowe.



Rys. 4.25. Punkty pomiarowe mikrotwardości badanych próbek

Analizy dokonano dla dwóch skrajnych wartości posuwu, a zależność tę przedstawiono na rysunku 4.26. Z poniższego rysunku wynika, że wraz ze wzrostem wartości odległości od powierzchni zewnętrznej mikrotwardość ma tendencję malejącą. Stabilizuje się ona na głębokości około 0,8 mm.



Rys. 4.26. Wpływ wartości posuwu na mikrotwardość w zależności od odległości od powierzchni zewnętrznej (v = 130 m·min^{-1}, a_p = 0,2 mm)

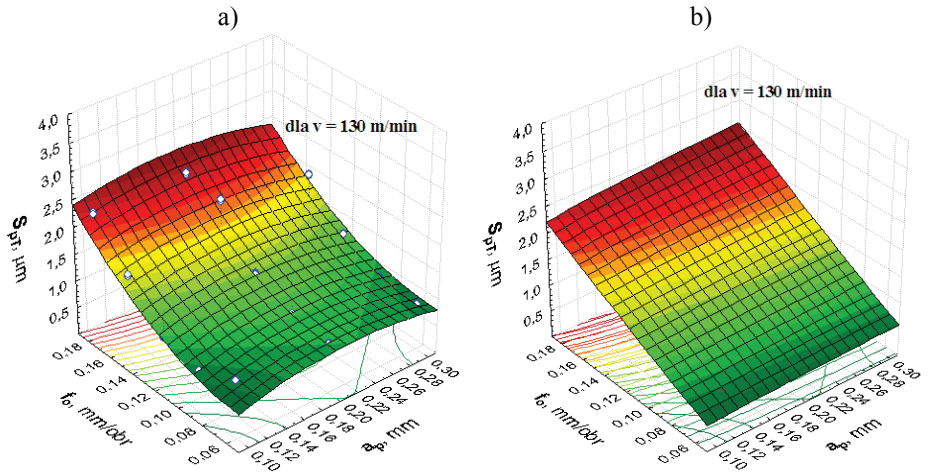
Uzyskane wyniki badań dotyczące wpływu zmiany wartości badanego parametru obróbki nie wskazują istotnych różnic mikrotwardości warstwy wierzchniej w badanym zakresie.

4.6.6. Wnioski z badań technologicznych

Pomiary struktury geometrycznej powierzchni są niezwykle istotne. Oprócz kontroli procesów wytwarzania, celem ich jest przewidywanie właściwości funkcjonalnych powierzchni, niezwykle ważnych w procesie eksploatacji.

Ważnym aspektem powyższych badań jest określenie parametrów topografii sterowanych w procesie wytwarzania.

Przedstawione zależności matematyczne pozwalają na prognozowanie otrzymanych powierzchni w wyniku obróbki toczeniem. Porównanie otrzymanych wartości wyników eksperymentalnych i obliczonych świadczy o poprawnie dobranych równaniach. Przykładowe porównanie wyników otrzymanych eksperymentalnie i obliczonych z zależności matematycznych dla parametru amplitudowego S_{pT} przedstawiono na rysunku 4.27.



Rys. 4.27. Porównanie wartości parametru S_{pT} otrzymanych na podstawie: a) badań empirycznych, b) zależności matematycznych

Cel tej części badań własnych został osiągnięty. Analizowane powierzchnie otrzymane w wyniku operacji technologiczne stanowią obiekt badań eksploatacyjnych, które omówiono w dalszej części pracy.

4.7. BADANIA EKSPLOATACYJNE PAR TOCZNYCH

Celem tej części badań własnych było określenie i opisanie zależnościami matematycznymi zmian cech użytkowych elementów tocznych par kinematycznych, takich jak: moment tarcia, zużycie liniowe oraz zmiana wartości parametrów topografii powierzchni podczas eksploatacji.

Czynnikami wejściowymi był czas pracy skojarzenia τ oraz chropowatość początkowa badanych powierzchni wyrażona parametrem S_{qT}. Zakres i wartości

pierwszego z czynników zostały określone na podstawie badań wstępnych, drugi został ustalony na podstawie badań własnych technologicznej warstwy wierzchniej. Przyjęto trzy wartości parametru S_{qT} wynoszące odpowiednio: 0,5 μm, 0,8 μm, 1,1 μm.

Powierzchnie do tej części badań przygotowano dwiema technikami wytwarzania: toczeniem oraz w celach porównawczych – w wyniku szlifowania. Obróbka ścierna jest podstawową metodą wytwarzania powierzchni roboczych walcowych łożysk tocznych. Otrzymane wyniki analiz pozwolą na określenie różnic i cech wspólnych badanych powierzchni.

4.7.1. Badania wstępne

Analizując proces zużywania węzła tribologicznego, wyróżnia się 3 jego fazy. Przedstawione badania dotyczą fazy pierwszej, zwanej okresem docierania, charakteryzującej się krótkotrwałym okresem zużywania początkowego. Cechami tego okresu są: gwałtowna, lecz stopniowo stabilizująca się intensywność zużycia oraz stabilizacja oporów tarcia. Czas trwania tego okresu nie jest jednoznacznie określony; jest zróżnicowany dla różnych skojarzeń.

Celem badań wstępnych było określenie czasu pracy skojarzenia, po upływie którego następuje przejście do drugiej fazy procesu zużywania – okresu niewielkich zmian. Warunki badań przedstawione zostały w podrozdziale 4.4.

Jako miarę określenia czasu badań eksploatacyjnych przyjęto zmianę wartości momentu tarcia. Na tej podstawie oceniono, że moment tarcia stabilizuje się po upływie 1260 s pracy skojarzenia tribologicznego. Znając wymiary próbki, można stwierdzić, że gradient zmian wartości momentu tarcia dla badanych powierzchni był niewielki po przebyciu 786 metrów drogi tarcia.

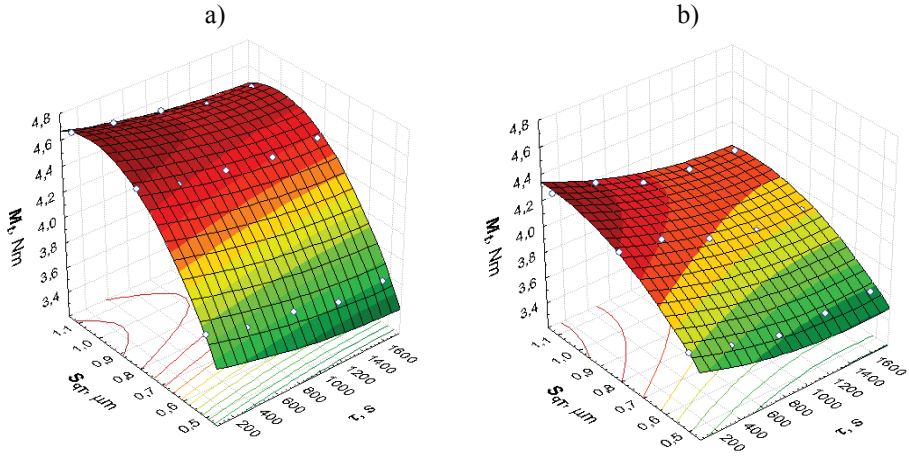
Przyjęto zakres czasu eksploatacji badanych powierzchni od 0 s do 1680 s, a pomiarów dokonywano w odstępach czasowych co 420 s. Odpowiada to przebytej drodze tarcia równej 262 metry. W przypadku momentu tarcia odczytu dokonywano w pierwszej minucie w celu wyeliminowania zakłóceń dotyczących rozruchu aparatury badawczej.

4.7.2. Badania zasadnicze

4.7.2.1. Wpływ wybranych czynników na moment tarcia

Podstawową cechą eksploatacyjną kinematycznych par tocznych są opory ruchu wyrażone momentem lub współczynnikiem tarcia.

Zależność momentu tarcia badanego węzła tribologicznego od wielkości wejściowych przedstawiono na rysunku 4.28.



Rys. 4.28. Wykresy zależności momentu tarcia M_t od czasu eksploatacji i chropowatości początkowej powierzchni otrzymanych w wyniku: a) toczenia, b) szlifowania

Na podstawie powyższych wykresów stwierdzić należy prawidłowość związaną z krzywą zużywania (Lorentza), ponieważ wraz z czasem współpracy elementów tocznych wartość momentu tarcia maleje. Maleje zarówno dla powierzchni roboczych szlifowanych, jak i toczonych. Gradient tych zmian jest podobny. Różnice otrzymanych wartości momentów tarcia między tymi powierzchniami uwidaczniają się dla różnych wartości chropowatości. Zmiana parametru S_{qT} z 0,5 µm do 1,1 µm powierzchni szlifowanych powodowała obniżenie momentu tarcia od 11 do 15% (w zależności od czasu), toczonych – od 22 do 25%. Dowodzi to, że moment tarcia występujący w parze kinematycznej z próbką wykonaną toczeniem charakteryzuje się większymi oporami ruchu, wynikającymi z kształtu nierówności powierzchni roboczych bieżni tocznych.

Zaobserwowane zmiany opisano zależnościami matematycznymi w postaci funkcji potęgowych.

W tabeli 4.11 przedstawiono wartości współczynników regresji niezbędnych do opisu matematycznego zmian momentu tarcia dla powierzchni toczonych.

Tabela 4.11. Współczynniki regresji i ich istotność funkcji $M_t = f(\tau, S_{qT})$ dla próbek wykonanych toczeniem

	b_0	$b_1(\tau)$	$b_2(S_{qT})$
b_i	5,053	-0,016	0,284
t-Stat	85,0256	-2,2209	10,8175
p-value	0,0001	0,0464	0,0001

Postać szczegółową równania, uwzględniającą powyższe dane, przedstawiono poniżej:

$$M_t = 5{,}053 \cdot \tau^{-0{,}016} \cdot S_{qT}^{0{,}284}, \text{ Nm} \tag{4.5}$$

a wartości statystyk wynoszą:
- współczynnik korelacji wielorakiej R = 0,9542
- współczynnik determinacji $R^2 = 0{,}9104$
- błąd standardowy s = 0,0329
- istotność modelu:

  $F_{obl} = 60{,}9748$
  p-value = 0,0001

Równanie z uwzględnieniem danych z tabeli 4.12, dla próbek szlifowanych, można zapisać za pomocą wzoru (4.6).

Tabela 4.12. Współczynniki regresji i ich istotność funkcji M_t = f (τ, S_{qT}) dla próbek szlifowanych

	$\mathbf{b_0}$	$\mathbf{b_1}$ (τ)	$\mathbf{b_2}$ (S_{qT})
$\mathbf{b_i}$	4,676	-0,020	0,163
t-Stat	170,4665	-5,7963	12,7013
p-value	0,0001	0,0001	0,0001

$$M_t = 4{,}676 \cdot \tau^{-0{,}02} \cdot S_{qT}^{0{,}163}, \text{ Nm} \tag{4.6}$$

a wartości statystyk wynoszą:
- współczynnik korelacji wielorakiej R = 0,9706
- współczynnik determinacji $R^2 = 0{,}9420$
- błąd standardowy s = 0,0161
- istotność modelu:

  $F_{obl} = 97{,}4600$
  p-value = 0,0001

Wartość ujemna współczynnika regresji dla zmiennej wejściowej – czasu eksploatacji oraz dodatnia dla drugiej zmiennej – technologicznej chropowatości – świadczy o dobrze przyjętych zależnościach.

W przypadku małych obciążeń istotny wpływ na opory ruchu, wyrażone momentem tarcia, ma zmieniająca się podczas eksploatacji chropowatość współpracujących powierzchni roboczych.

Wartość współczynników korelacji liniowej między parametrami struktury geometrycznej powierzchni badanych skojarzenia a momentem tarcia przedstawiono w tabeli 4.13.

Najlepszą korelacją z momentem tarcia wykazały się parametry amplitudowe powierzchni otrzymanych po szlifowaniu, tj.: S_{aE}, S_{qE} i S_{skE}, oraz parametry krzywej nośności S_{kE} i S_{mr1E}. Wpływ na zmianę momentu tarcia dla takiego skojarzenia ma głębokość chropowatości rdzenia i udział nośny wierzchołków.

Tabela. 4.13. Wartości współczynników korelacji Pearsona między parametrami SGP a momentem tarcia

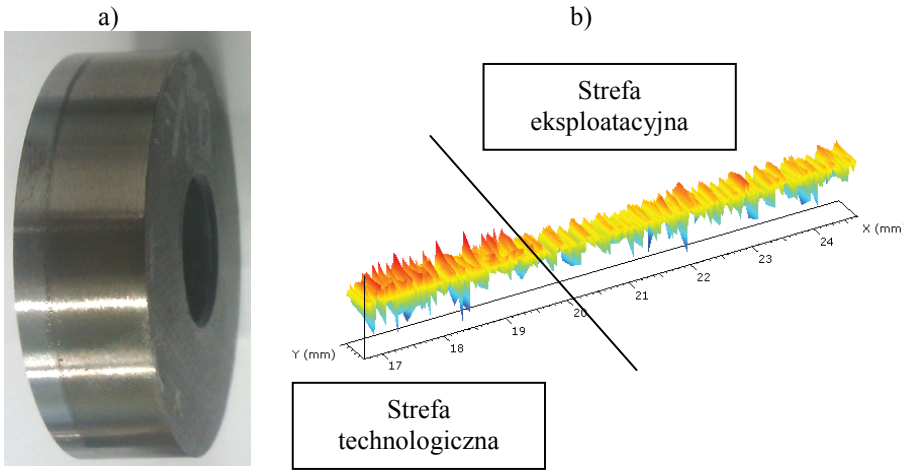
Parametry SGP		M_t powierzchnie szlifowane	M_t powierzchnie toczone
amplitudowe	S_{aE}	0,7827	0,5143
	S_{qE}	0,7669	0,486
	S_{pE}	0,3934	-0,3453
	S_{vE}	0,4313	0,4559
	S_{skE}	-0,7032	-0,0638
	S_{kuE}	-0,4437	0,0205
	S_{zE}	0,4169	0,3826
hybrydowe	S_{dqE}	-0,4563	0,2831
	S_{drE}	-0,5894	-0,6961
objętościowe	S_{mrE}	0,2077	-0,2005
	S_{mcE}	0,3934	-0,3453
przestrzenne	S_{alE}	0,3763	0,5132
	S_{trE}	0,3760	0,5133
krzywej nośności	S_{kE}	0,7871	0,0291
	S_{pkE}	0,0441	-0,1306
	S_{vkE}	0,3867	-0,0463
	S_{mr1E}	-0,7853	-0,1455
	S_{mr2E}	-0,0341	-0,4428

4.7.2.2. Wpływ topografii na zużycie liniowe

Jedną z wielkości opisujących cechy eksploatacyjnej warstwy wierzchniej jest zużywanie. Proces ten będzie miał różny charakter w zależności od: kinematyki ruchu, doboru materiałów elementów współpracujących, obciążeń, chropowatości powierzchni, warunków smarowania itp.

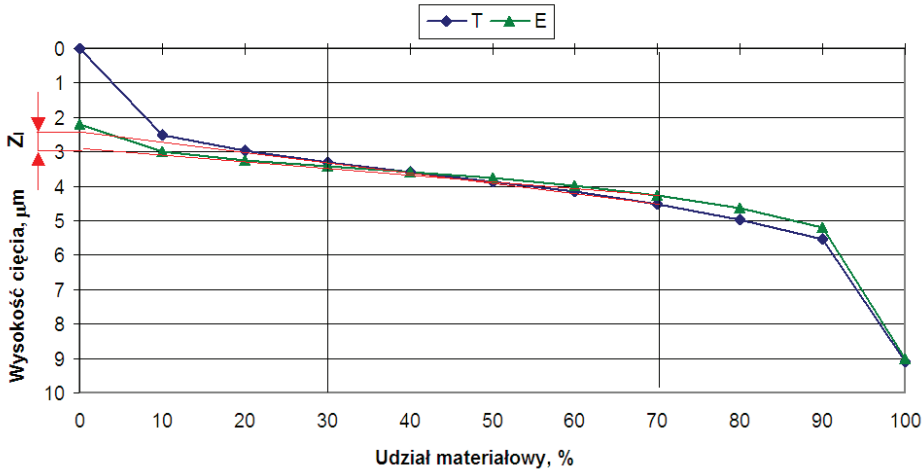
W celu określenia zużycia liniowego metodą profilometryczną pożądane jest wykonywanie pomiarów struktury geometrycznej powierzchni w tym samym miejscu przed próbą i po próbie. W badaniach eksploatacyjnych zaproponowano metodę pomiaru polegającą na ocenie powierzchni podzielonej na dwie strefy. Pierwsza strefa (nie podlegała użytkowaniu) powstała w wyniku procesu technologicznego, druga pod wpływem działania wymuszeń zewnętrznych w ustalonym czasie eksploatacji. Strefy te przedstawiono na rysunku 4.29.

Metoda ta pozwala na ocenę chropowatości, otrzymanej w różnych etapach użytkowania, na jednej powierzchni. Nie jest konieczne ścisłe określanie miejsca pomiaru przed eksploatacją i po eksploatacji powierzchni współpracujących.



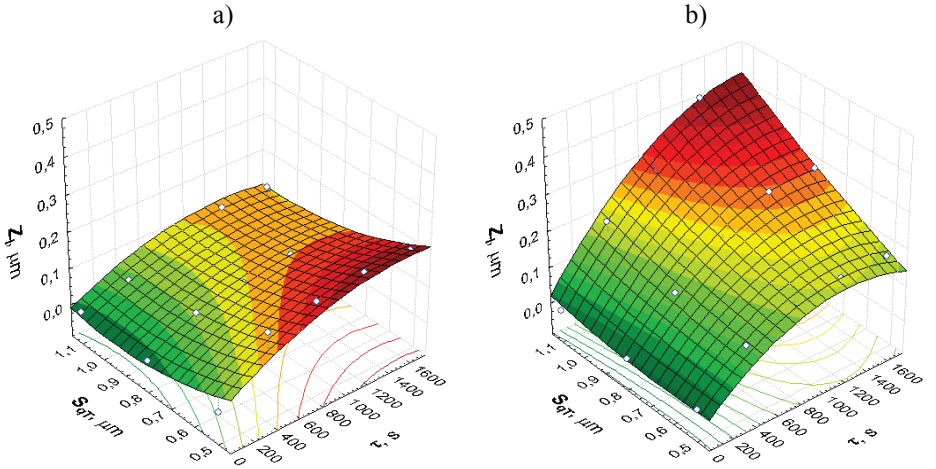
Rys. 4.29. Strefy powierzchni w badaniach eksploatacyjnych: a) widok bieżni, b) mierzona topografia

Przy niewielkim zużyciu niełatwe jest określenie zużycia liniowego. Wartość tego zużycia określano na podstawie przedłużenia liniowych fragmentów krzywych nośności, odpowiadających 30-70% udziału materiałowego i przecięciu z osią rzędnych. Otrzymaną różnicę przyjęto jako miarę zużycia liniowego. Metodę tę przedstawiono na rysunku 4.30.



Rys. 4.30. Metoda określania zużycia liniowego w badaniach eksploatacyjnych (T – krzywa dla powierzchni technologicznej, E – krzywa dla powierzchni eksploatacyjnej)

Otrzymane wyniki przedstawiono w formie graficznej na rysunku 4.31.



Rys. 4.31. Wykresy zależności intensywności zużycia Z_l od czasu eksploatacji i chropowatości początkowej powierzchni otrzymanych w wyniku: a) toczenia, b) szlifowania

Dla powierzchni szlifowanych zużycie liniowe zmniejsza się wraz ze wzrostem gładkości powierzchni poddanych procesowi eksploatacji.

Inny charakter ma krzywa powierzchniowa dla próbek wykonanych toczeniem. Intensywność zużycia wzrasta również w czasie eksploatacji, lecz gradient wzrostu jest mniejszy niż dla powierzchni szlifowanych. Jest to spowodowane sinusoidalnym charakterem topografii otrzymanej po obróbce zdefiniowaną geometrią narzędzia.

Określone w ten sposób zużycie opisano zależności matematycznymi (4.7) i (4.8) z uwzględnieniem danych z tabel 4.14 i 4.15.

Tabela 4.14. Współczynniki regresji i ich istotność funkcji $Z_l = \mathrm{f}(\tau, S_{qT})$ dla próbek toczonych

	$\mathbf{b_0}$	$\mathbf{b_1}$ (τ)	$\mathbf{b_2}$ (S_{qT})
$\mathbf{b_i}$	0,004	0,426	-1,384
t-Stat	-9,2291	4,8153	-9,7237
p-value	0,0001	0,0009	0,0001

Równanie ma postać:

$$Z_l = 0{,}004 \cdot \tau^{0{,}426} \cdot S_{qT}^{-1{,}384}, \text{ µm} \tag{4.7}$$

a wartości statystyk wynoszą:

– współczynnik korelacji wielorakiej R = 0,9638

– współczynnik determinacji $R^2 = 0,9290$
– błąd standardowy $s = 0,1597$
– istotność modelu:
$F_{obl} = 58,8692$
p-value = 0,0001

Tabela 4.15. Współczynniki regresji i ich istotność funkcji $Z_l = f(\tau, S_{qT})$ dla próbek szlifowanych

	b_0	b_1 (τ)	b_2 (S_{qT})
b_i	0,006	0,538	0,891
t-Stat	-9,851	7,276	7,503
p-value	0,0001	0,0001	0,0001

Równanie z uwzględnieniem danych z tabeli 4.15 ma postać:

$$Z_l = 0,006 \cdot \tau^{0,538} \cdot S_{qT}^{0,891}, \mu m \tag{4.8}$$

a wartości statystyk wynoszą:
– współczynnik korelacji wielorakiej $R = 0,9612$
– współczynnik determinacji $R^2 = 0,9239$
– błąd standardowy $s = 0,1333$
– istotność modelu:
$F_{obl} = 54,6148$
p-value = 0,0001

Powyższe zależności wyrażają zużycie liniowe od czasu pracy pary tocznej i chropowatości początkowej powierzchni roboczych tych par. Wartości współczynników korelacji i determinacji świadczą o odpowiednio dobranych modelach.

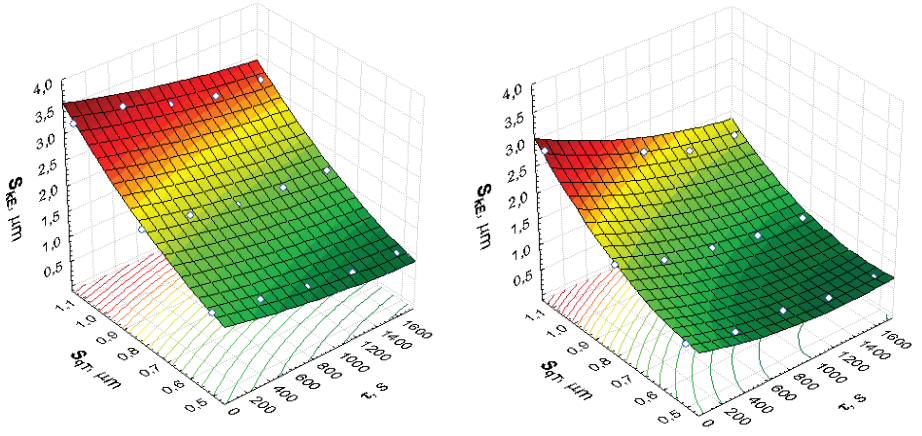
Wartości korelacji liniowej między parametrami struktury geometrycznej powierzchni toczonych i szlifowanych a zużyciem liniowym przedstawiono w tabeli 4.16.

Parametrem struktury geometrycznej powierzchni o dużym współczynniku korelacji z zużyciem liniowym dla próbek toczonych i szlifowanych jest parametr S_{kE}. Na podstawie jego zmian można oceniać proces zużywania. Na rysunku 4.32 przedstawiono zależność wysokości chropowatości rdzenia S_{kE} od czasu eksploatacji i chropowatości powierzchni toczonych i szlifowanych.

Tabela 4.16. Wartości współczynników korelacji między parametrami SGP a zużyciem liniowym

Parametry SGP		Z_l powierzchnie szlifowane	Z_l powierzchnie toczone
amplitudowe	S_{aE}	-0,8252	-0,4116
	S_{qE}	-0,8181	-0,2069
	S_{pE}	-0,5537	-0,3439
	S_{vE}	-0,5176	0,1970
	S_{skE}	0,6540	-0,1151
	S_{kuE}	0,4335	0,5319
	S_{zE}	-0,5577	0,3366
hybrydowe	S_{dqE}	0,3576	-0,2659
	S_{drE}	0,4578	-0,8145
objętościowe	S_{mrE}	-0,1313	0,3722
	S_{mcE}	-0,5537	-0,3439
przestrzenne	S_{alE}	-0,2997	0,2866
	S_{trE}	-0,2994	0,2871
krzywej nośności	S_{kE}	-0,8730	-0,7987
	S_{pkE}	-0,1588	-0,7382
	S_{vkE}	-0,3559	0,4033
	S_{mr1E}	0,8266	-0,1157
	S_{mr2E}	0,0248	-0,7078

a) b)



Rys. 4.32. Wykresy zależności wysokości chropowatości rdzenia S_{kE} od czasu eksploatacji i chropowatości początkowej powierzchni otrzymanych w wyniku: a) toczenia, b) szlifowania

Otrzymane wyniki badań świadczą o podobnym charakterze jakościowym wykresów, jednak różnym co do wartości. Badane powierzchnie szlifowane cechowały się mniejszymi wartościami tego parametru niż powierzchnie toczone. Mała wartość S_{kE} świadczą o tym, że profil chropowatości ma charakter powierzchni typu plateau. Powierzchnia tego typu charakteryzuje się dużą nośnością, małym tarciem oraz odpornością na zacieranie – ma zatem cechy bardzo pożądane dla powierzchni roboczych łożysk tocznych.

4.7.2.3. Zmiana topografii powierzchni w okresie docierania elementów tocznych

Struktura geometryczna powierzchni jest jednym z głównych czynników mających wpływ na występowanie oraz rodzaj zużywania. Nierówności powierzchni decydują o wartości zużycia – zwłaszcza w początkowym etapie pracy skojarzenia. Okres ten zależy od topografii powierzchni i sam wywołuje jej zmianę.

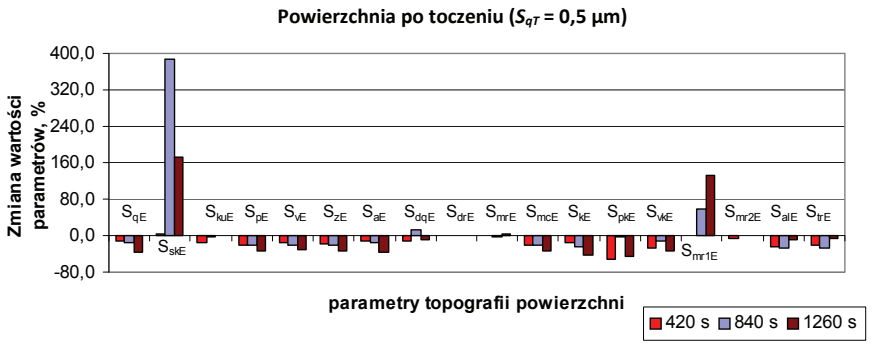
Do badań eksploatacyjnych próbki przygotowano w dwojaki sposób: toczeniem i szlifowaniem. Wartości średnie parametrów topografii otrzymanej obróbką skrawaniem przedstawiono w tabeli 4.17.

Tabela. 4.17. Wartości średnie parametrów topografii powierzchni przygotowanych do badań eksploatacyjnych obróbką toczeniem

Parametry SGP		**Wartości średnie**		
amplitudowe	$\mathbf{S_{qT}}$	0,51 μm	0,81 μm	1,1 μm
	$\mathbf{S_{aT}}$	0,422 μm	0,646 μm	0,93 μm
	$\mathbf{S_{pT}}$	1,446 μm	2,632 μm	2,627 μm
	$\mathbf{S_{vT}}$	1,426 μm	2,237 μm	2,84 μm
	$\mathbf{S_{skT}}$	-0,042	0,24	-0,319
	$\mathbf{S_{kuT}}$	2,589	2,938	2,142
	$\mathbf{S_{zT}}$	2,872 μm	4,869 μm	5,467 μm
hybrydowe	$\mathbf{S_{dqT}}$	0,0209	0,0493	0,0456
	$\mathbf{S_{drT}}$	1,0008	1,0045	1,0039
objętościowe	$\mathbf{S_{mrT}}$	5,168%	5,089%	5,07%
	$\mathbf{S_{mcT}}$	1,446 μm	2,632 μm	2,627 μm
przestrzenne	$\mathbf{S_{alT}}$	150	50	57,69
	$\mathbf{S_{trT}}$	0,0146	0,0049	0,0056
krzywej nośności	$\mathbf{S_{kT}}$	1,52 μm	2,11 μm	2,94 μm
	$\mathbf{S_{pkT}}$	0,4 μm	1,2 μm	0,58 μm
	$\mathbf{S_{vkT}}$	0,39 μm	0,74 μm	0,92 μm
	$\mathbf{S_{mr1T}}$	7,207%	13,819%	4,101%
	$\mathbf{S_{mr2T}}$	92,916%	92,03%	83,846%

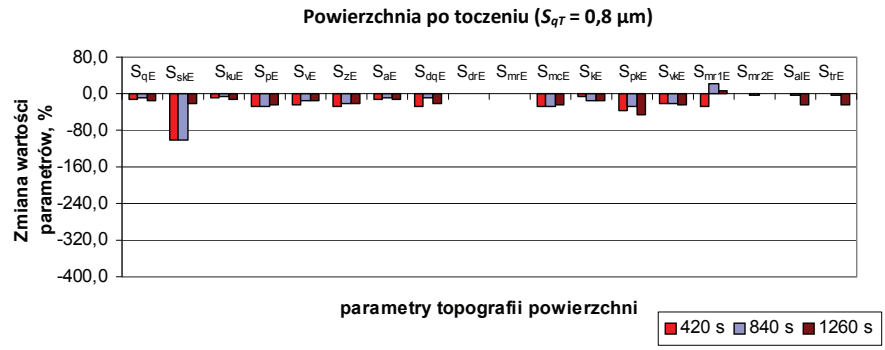
Otrzymane w ten sposób powierzchnie robocze poddano eksploatacji w skojarzeniu z przewagą tarcia tocznego. Zmiany analizowanych topografii, w punktach charakterystycznych określonych na podstawie badań wstępnych, dla różnej chropowatości początkowej przedstawiono na rysunkach 4.33-4.35.

Największe procentowe zmiany powierzchni gładkiej (S_{qT}= 0,5 µm) zaobserwowano dla parametrów S_{skE} i S_{mr1E}. Pierwszy z nich w początkowym okresie badania wzrósł o 390%, następnie wartość jego zmalała, co świadczy o tym, że powierzchnia robocza w tym okresie charakteryzowała się dużą liczbą wzniesień.



Rys. 4.33. Wartości średnie procentowych zmian parametrów topografii powierzchni toczonej w czasie eksploatacji dla S_{qT}= 0,5 µm

Parametry pionowe, takie jak S_{qE} czy S_{aE}, zmniejszały się w trakcie zużywania się powierzchni.

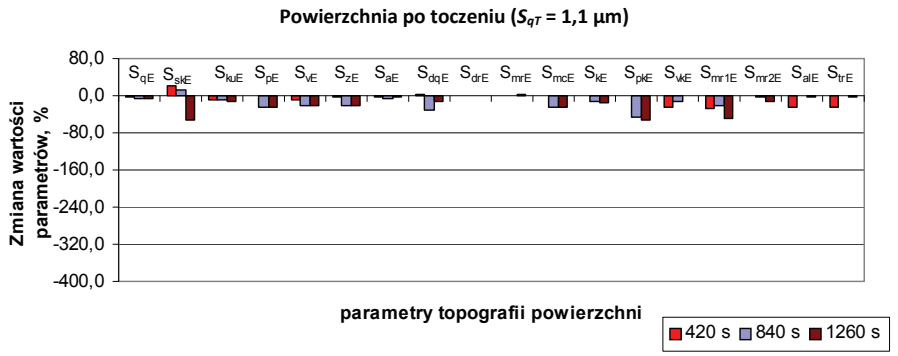


Rys. 4.34. Wartości średnie procentowych zmian parametrów topografii powierzchni toczonej w czasie eksploatacji dla S_{qT}= 0,8 µm

Niewielkie procentowe zmiany zaobserwowano dla powierzchni o większych wartościach S_{qT} równych 0,8 µm i 1,1 µm.

Dla trzech przedstawionych graficznych interpretacji zmian parametrów struktury geometrycznej powierzchni można zauważyć, że wartość parametru hybrydowego S_{drE} nie ulega zmianom. Jest to parametr dotyczący rozwinięcia

powierzchni i silnie korelujący ($r_{XY} = 0{,}8851$) z innym parametrem hybrydowym S_{dqE} – średnim kwadratowym nachyleniem nierówności.



Rys. 4.35. Wartości średnie procentowych zmian parametrów topografii powierzchni toczonej w czasie eksploatacji dla $S_{qT} = 1{,}1$ µm

Analiza wyników przedstawionych w tabeli 4.18 pozwala na sformułowanie wniosku, że tylko jeden parametr koreluje z czasem eksploatacji. Jest nim chropowatość rdzenia S_{kE}. Pozostałe mają słabą lub niewielką korelację z czasem eksploatacji.

Tabela 4.18. Wartości współczynników korelacji między parametrami SGP a czasem eksploatacji (powierzchnie toczone)

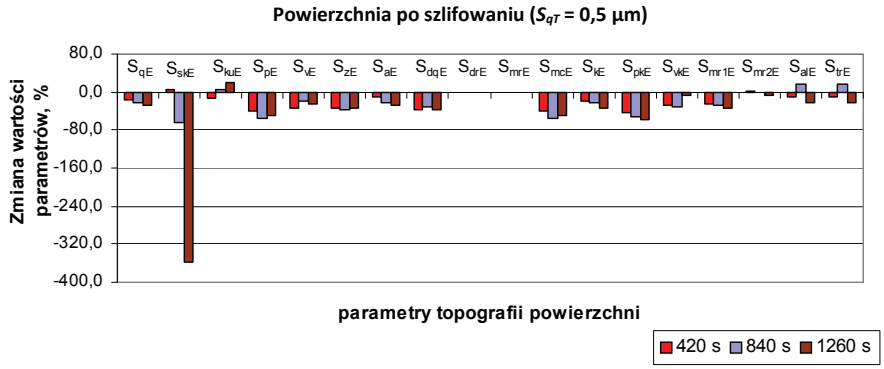
Parametry SGP		τ
amplitudowe	S_{aE}	-0,3794
	S_{qE}	-0,3747
	S_{pE}	-0,4827
	S_{vE}	-0,4568
	S_{skE}	0,1639
	S_{kuE}	0,2083
	S_{zE}	-0,5145
hybrydowe	S_{dqE}	-0,0689
	S_{drE}	-0,1425
objętościowe	S_{mrE}	0,5298
	S_{mcE}	-0,4827
przestrzenne	S_{alE}	0,1476
	S_{trE}	0,1472
krzywej nośności	S_{kE}	-0,6296
	S_{pkE}	-0,3945
	S_{vkE}	0,1756
	S_{mr1E}	0,3860
	S_{mr2E}	-0,2773

Drugim sposobem przygotowania badanych bieżni walcowych łożysk tocznych było szlifowanie. Wartości średnie wejściowych parametrów topografii powierzchni, przyjęte w programie badań eksploatacyjnych, przedstawiono w tabeli 4.19.

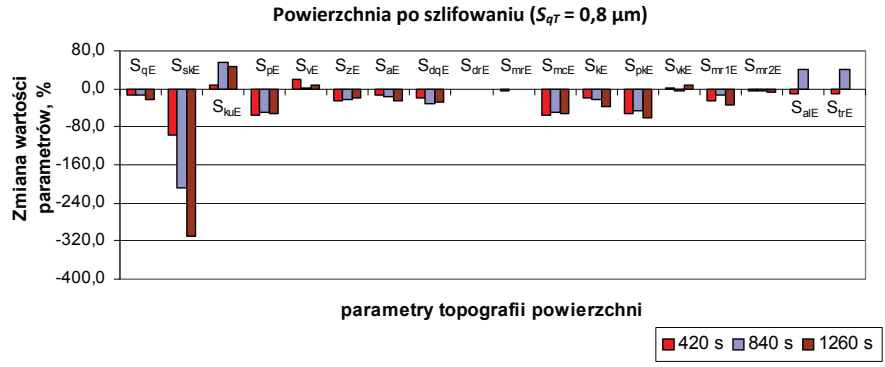
Tabela. 4.19. Wartości średnie parametrów topografii powierzchni przygotowanych do badań eksploatacyjnych obróbką szlifowaniem

Parametry SGP		**Wartości średnie**		
amplitudowe	S_{qT}	0,5 µm	0,78 µm	1,09 µm
	S_{aT}	0,385 µm	0,619 µm	0,858 µm
	S_{pT}	1,387 µm	2,528 µm	3,775 µm
	S_{vT}	2,302 µm	2,754 µm	4,936 µm
	S_{skT}	-0,834	-0,267	-0,406
	S_{kuT}	4,114	3,102	3,678
	S_{zT}	3,69 µm	5,282 µm	8,711 µm
hybrydowe	S_{dqT}	0,0383	0,0818	0,1017
	S_{drT}	1,0026	1,0119	1,0178
objętościowe	S_{mrT}	5,046%	5,023%	5,1%
	S_{mcT}	1,387 µm	2,528 µm	3,775 µm
przestrzenne	S_{alT}	110	60	80
	S_{trT}	0,0107	0,0059	0,0078
krzywej nośności	S_{kT}	1,12 µm	1,96 µm	2,66 µm
	S_{pkT}	0,32 µm	0,69 µm	0,97 µm
	S_{vkT}	0,76 µm	0,92 µm	1,45 µm
	S_{mr1T}	7,593%	8,965%	9,149%
	S_{mr2T}	84,948%	88,47%	88,228%

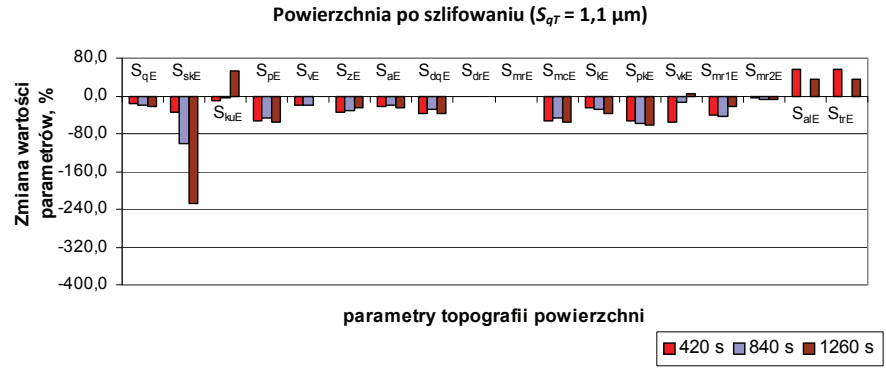
Największe zmiany topografii bieżni powierzchni szlifowanych, przedstawione na rysunkach 4.36, 4.37 i 4.38, obserwuje się dla parametru S_{skE} (skośność), którego wartość początkowa była ujemna. W czasie eksploatacji nastąpiło zmniejszenie tej wartości. Gradient tych zmian był różny, największy (360%) dla powierzchni o mniejszej chropowatości początkowej, a najmniejszy (260%) dla powierzchni charakteryzującej się parametrem wejściowym S_{qT} na poziomie 1,1 µm. Ujemna wartość skośności, otrzymana podczas badań eksploatacyjnych, pozwala ocenić badaną powierzchnię jako dobrą powierzchnię łożyskową.



Rys. 4.36. Wartości średnie procentowych zmian parametrów topografii w czasie eksploatacji dla roboczych powierzchni szlifowanych (S_{qT} = 0,5 µm)



Rys. 4.37. Wartości średnie procentowych zmian parametrów topografii w czasie eksploatacji dla roboczych powierzchni szlifowanych (S_{qT} = 0,8 µm)



Rys. 4.38. Wartości średnie procentowych zmian parametrów topografii w czasie eksploatacji dla roboczych powierzchni szlifowanych (S_{qT} = 1,1 µm)

Istotnym współczynnikiem korelacji liniowej (tabela 4.20), wynoszącym r_{XY} = 0,7054 w stosunku do czasu eksploatacji, charakteryzuje się parametr S_{kuE} (kurtoza). Początkowe wartości tego parametru, powyżej 3, świadczą o smukłym charakterze krzywej rozkładu amplitudy, co przejawia się ostrymi wierzchołkami i rowkami na powierzchni. Wartość kurtozy ma tendencje wzrastające, tylko dla powierzchni o S_{qT} = 0,8 μm na początkowym etapie eksploatacji maleje (następuje spłaszczenie krzywej), a następnie wzrasta.

Powyższy charakter zmian dwóch przedstawionych parametrów świadczy o postępującym procesie zużywania.

Tabela 4.20. Wartości współczynników korelacji między parametrami SGP a czasem eksploatacji (powierzchnie szlifowane)

Parametry SGP		**τ**
amplitudowe	$\mathbf{S_{aE}}$	-0,6488
	$\mathbf{S_{qE}}$	-0,3458
	$\mathbf{S_{pE}}$	-0,2717
	$\mathbf{S_{vE}}$	0,1253
	$\mathbf{S_{skE}}$	-0,4326
	$\mathbf{S_{kuE}}$	0,7054
	$\mathbf{S_{zE}}$	0,2901
hybrydowe	$\mathbf{S_{dqE}}$	-0,2444
	$\mathbf{S_{drE}}$	-0,2022
objętościowe	$\mathbf{S_{mrE}}$	0,2759
	$\mathbf{S_{mcE}}$	-0,2717
przestrzenne	$\mathbf{S_{alE}}$	-0,1356
	$\mathbf{S_{trE}}$	-0,1356
krzywej nośności	$\mathbf{S_{kE}}$	-0,8775
	$\mathbf{S_{pkE}}$	-0,7033
	$\mathbf{S_{vkE}}$	0,6241
	$\mathbf{S_{mr1E}}$	0,0110
	$\mathbf{S_{mr2E}}$	-0,6064

Ważnymi parametrami ulegającymi zmianom podczas eksploatacji powierzchni elementów tocznych są parametry krzywej nośności: S_{kE}, S_{pkE} i S_{vkE}. Wartość zredukowanej wysokości wzniesień S_{pkE} zmniejsza się w czasie pracy węzła tarcia, co świadczy o odporności powierzchni na ścieranie. Odwrotną tendencją charakteryzuje się zredukowana głębokość wgłębień S_{vkE}. W początkowym okresie docierania wartość tego parametru malej, aby następnie wzrosnąć. Oznacza to powstawanie wgłębień istotnych przy powierzchniach współpracujących ze sobą w obecności środka smarnego.

Analizę szczegółową parametru S_{kE} przedstawiono w rozdziale dotyczącym wpływu topografii na zużycie liniowe.

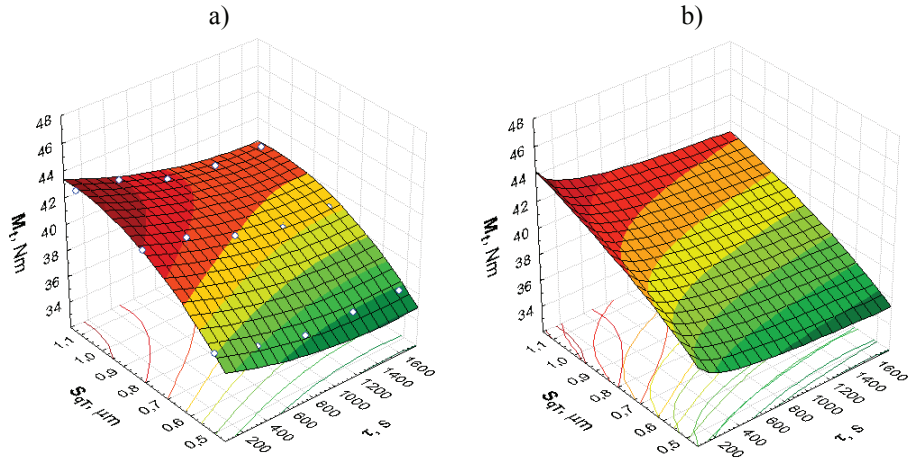
4.7.3. Wnioski z badań eksploatacyjnych

Na podstawie przedstawionych analiz wyników badań, dla dwóch powierzchni otrzymanych różnymi technikami wytwarzania, współpracujących w parze tocznej, można wyciągnąć następujące wnioski:

1) większymi oporami ruchu charakteryzuje się skojarzenie o powierzchni roboczej wykonanej toczeniem,
2) lepiej korelują z momentem tarcia parametry opisujące topografię powierzchni szlifowanych,
3) zużycie liniowe dla małej chropowatości początkowej jest zbliżone dla obu powierzchni, wraz ze wzrostem nierówności zużycie jest mniejsze dla bieżni toczonych,
4) mniejsze wartości zmian parametru krzywej nośności zauważono dla pary kinematycznej z powierzchnią szlifowaną,
5) parametrem, który ulegał największym zmianom podczas badań eksploatacyjnych był współczynnik skośności S_{skE}.

Jednym z celów badań eksploatacyjnych było określenie zależności matematycznych cech użytkowych warstwy wierzchniej od czynników zewnętrznych.

Przykładowe porównanie wartości momentu tarcia otrzymanych eksperymentalnie i obliczonych z równań regresji, prezentowanych w badaniach własnych, przedstawiono na rysunku 4.39.



Rys. 4.39. Porównanie wartości momentu tarcia M_t, skojarzenia z powierzchnią szlifowaną, otrzymanych na podstawie: a) badań empirycznych, b) zależności matematycznych

Podsumowując badania dotyczące eksploatacyjnej warstwy wierzchniej, należy zaznaczyć, że bardzo trudno jest określić udział poszczególnych, elementarnych składowych procesu zużywania, gdyż przedstawione zjawiska i procesy w formie czystej w praktyce nie występują. Czynione są próby w tym zakresie, czego przykładem są analizy przedstawione w tym rozdziale.

4.8. PODSUMOWANIE BADAŃ WŁASNYCH – CHARAKTERYSTYKI TECHNOLOGICZNO-EKSPLOATACYJNE

Wnioski i podsumowanie badań własnych dotyczących technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej przedstawiono w poszczególnych podrozdziałach.

Dotychczasowe badania tribologiczne nie wskazały na zależności wiążące bezpośrednio parametry technologiczne wytwarzania warstwy wierzchniej z jej właściwościami eksploatacyjnymi. W literaturze można jedynie spotkać pozycje, które dotyczą algorytmu postępowania dla kształtowania warstwy wierzchniej na etapie jej wytwarzania [135] czy algorytmu metod badań prowadzonych na aparacie czterokulowym T-02 [181].

Oceniając kompleksowo badania własne, należy wskazać na możliwość określenia relacji między parametrami obróbki toczeniem a cechami eksploatacyjnymi WW, takimi jak moment tarcia czy zużycie liniowe.

Modelowanie zużywania, w głównej mierze odpowiedzialnego za uszkodzenia maszyn stanowi ważne zagadnienie badań tribologicznych. Badania zużywania zmierzają głównie do identyfikacji mechanizmów niszczenia w określonych warunkach pracy węzła tarciowego oraz poszukiwania metod umożliwiających sterowanie tymi procesami. Przyjmując, że otrzymane powierzchnie walcowych łożysk tocznych charakteryzują się pewną wartością parametru topografii S_{qT}, otrzymaną przy określonych parametrach skrawania (wzór 4.1, $S_{qT} = 1{,}973 \cdot v^{-0{,}144} \cdot a_p^{0{,}067} \cdot f_o^{0{,}101}$), można obliczyć zużycie liniowe korzystając ze wzoru (4.7, $Z_l = 0{,}004 \cdot \tau^{0{,}426} \cdot S_{qT}^{-1{,}384}$). W ten sposób otrzymano zależność cechy użytkowej (Z_l) od parametrów technologicznych (v, a_p, f_o) i eksploatacyjnego wymuszenia zewnętrznego (τ) dla znanych warunków na początku pracy skojarzenia przedstawioną poniżej (4.8):

$$Z_l = 0{,}0016 \cdot \tau^{0{,}426} \cdot v^{0{,}2} \cdot a_p^{-0{,}093} \cdot f_o^{-0{,}14}, \text{ µm} \tag{4.8}$$

Na podstawie powyższego równania można stwierdzić, że zużycie liniowe wzrasta wraz ze wzrostem czasu eksploatacji oraz wraz z prędkością skrawania zastosowaną w obróbce powierzchni roboczych łożysk tocznych. Wzrost pozostałych dwóch parametrów toczenia powoduje zmniejszenie się zużycia w badanym zakresie.

oporów ruchu (w badanym, początkowym okresie pracy) oraz parametry wytwarzania powierzchni roboczych. W tym przypadku korzysta się z równania (4.5, $M_t = 50{,}529 \cdot \tau^{-0{,}016} \cdot S_{qT}^{0{,}284}$) i otrzymuje zależność (4.9):

$$M_t = 61{,}286 \cdot \tau^{-0{,}016} \cdot v^{-0{,}041} \cdot a_p^{0{,}019} \cdot f_o^{0{,}029}, \text{ Nm} \tag{4.9}$$

Moment tarcia maleje w czasie eksploatacji i ze wzrostem prędkości skrawania, co jest spowodowane otrzymywaną mniej chropowatą powierzchnią badaną. Wzrost pozostałych parametrów obróbki powoduje wzrost oporów ruchu węzła tribologicznego.

Z porównania dwóch przedstawionych powyżej zależności można wysunąć wniosek, że wzrost wartości tych samych parametrów skrawania powoduje odmienne skutki dla wartości otrzymanych cech eksploatacyjnych.

Zaproponowane zależności mogą służyć do oszacowania cech eksploatacyjnych warstwy wierzchniej tocznych par kinematycznych od parametrów skrawania dla określania relacji wpływu parametrów technologicznych na proces eksploatowania.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

W wyniku analiz poprzedzających badania doświadczalne oraz samych badań dokonano szeregu spostrzeżeń, na podstawie których możliwe było sformułowanie wniosków. Podzielono je na dwie grupy:

- wnioski poznawcze, mające charakter ogólny,
- wnioski utylitarne, praktyczne.

Rezultaty badań pozwoliły także na zaproponowanie kierunków dalszych badań zarówno eksperymentalnych, jak i analitycznych.

Wykorzystanie wniosków przedstawionych w pracy oraz ich zastosowanie w praktyce inżynierskiej powinno przyczynić się do lepszego poznania przebiegu zjawisk zachodzących w warstwie wierzchniej, a także rozszerzyć możliwości sterowania nimi.

Efektem łącznym opisanych działań będzie poprawa jakości par kinematycznych z tarciem tocznym (lub ze zdecydowaną przewagą tej odmiany tarcia), przejawiająca się w formie zwiększonych osiągów oraz niezawodności maszyn, w których pary kinematyczne zastosowano.

5.1. WNIOSKI POZNAWCZE

Sformułowane poniżej wnioski mają charakter ogólny. Stanowią element pracy rozszerzający wiedzę w zakresie związanym z problematyką publikacji:

1. Technologiczne sterowanie cechami eksploatacyjnymi warstwy wierzchniej wymaga wszechstronnej informacji o jakościowych i ilościowych procesach zużywania elementów podczas ich eksploatacji.
2. Przeprowadzona weryfikacja czynników determinujących transformację TWW potwierdziła doniesienia literaturowe o istotności głównie jednego z nich – posuwu. Stwierdzona prawidłowość jest zgodna z charakterem zmian w strukturze geometrycznej powierzchni.
3. Wskazanie parametrów topografii powierzchni sterowanych w obróbce skrawaniem (toczeniem) jako samodzielnych oraz mających wpływ na cechy użytkowe powierzchni roboczych w parach tocznych podczas docierania powoduje redundancję czynników badawczych.
4. Struktura geometryczna powierzchni, szczególnie elementów współpracujących ze sobą, powinna być analizowana na podstawie parametrów 3D.
5. Podczas procesu eksploatowania następują wyraźne zmiany cech użytkowych, które mają związek z czynnikami determinującymi proces zużywania powodowany w przypadku badanych par kinematycznych tarciem tocznym. Przeprowadzone badania wykazały, że transformacja EWW podczas pracy skojarzenia tocznego zachodzi w sposób ewolucyjny.
6. Dokonane analizy transformacji warstwy wierzchniej wykazały, że należy zmiany te rozpatrywać z uwzględnieniem dwóch różnych etapów. Spostrze-

żenie to upoważnia do opisania równaniami matematycznymi relacji między parametrami technologicznymi a cechami użytkowymi.

5.2. WNIOSKI UTYLITARNE

Wnioski z tej grupy mają charakter utylitarny. Można je wykorzystać bezpośrednio w praktyce inżynierskiej. Szczególnie przydatne mogą być w projektowaniu procesów z przewagą tarcia tocznego:

1. Zastosowana metoda pomiaru zużycia liniowego pozwala z dużym prawdopodobieństwem określić wartość tej cechy użytkowej WW.
2. Podobieństwo zmian zachodzących w okresie docierania dla powierzchni otrzymanych toczeniem i szlifowanie dla małej wartości początkowej chropowatości wskazuje na możliwość stosowania obu tych technik w wytwarzaniu elementów tocznych walcowych łożysk tocznych.
3. Opracowane modele matematyczne opisujące relacje między parametrami obróbki a zmianami wartości chropowatości technologicznej warstwy wierzchniej mogą stanowić pomocnicze narzędzie w prognozowaniu jej przebiegu.
4. Znajomość przebiegu transformacji EWW jest niezbędnym elementem w projektowaniu i modelowaniu procesów eksploatowania wszelkich maszyn. Przydatna jest ona także w ich diagnozowaniu.
5. Znajomość przebiegu transformacji można wykorzystać przy projektowaniu procesu wytwórczego elementów par kinematycznych, a ściślej przy doborze parametrów stosowanych metod obróbki. Parametry te w dużym stopniu determinują cechy użytkowe technologicznej warstwy wierzchniej, powstałej w wyniku realizacji określonych operacji technologicznych.

5.3. PODSUMOWANIE PRACY, PROPOZYCJE DALSZYCH BADAŃ

Powyższe wnioski upoważniają do stwierdzenia, że teza naukowa sformułowana we wstępnej fazie realizacji pracy jest prawdziwa. Stwierdzono mianowicie, że przyjęty zbiór czynników w istotny sposób wpływa na przebieg zmian w warstwie wierzchniej podczas eksploatowania pary kinematycznej z tarciem tocznym, a zatem takiej, w której występuje skoncentrowany styk między współpracującymi elementami pary. Stwierdzić można, że założony cel pracy został osiągnięty.

Praca dostarczyła także sugestii, w jakim kierunku powinny być prowadzone dalsze badania. Sugeruje się przeprowadzenie badań dotyczących następujących zagadnień:

– przeprowadzenia badań eksploatacyjnych obejmujących dwa kolejne okresy żywotności badanych łożysk w celu określenia wpływu okresu docierania na trwałość walcowych łożysk tocznych,

- znalezienia relacji między większą liczbą wymuszeń technologicznych a cechami użytkowymi warstw wierzchnich. Przyczyniłoby się to do lepszego poznania przebiegu transformacji warstwy wierzchniej,
- dalszego pogłębiania znajomości procesu tarcia tocznego jako systemu zjawisk elementarnych uzależnionych od czynników konstrukcyjnych, technologicznych i eksploatacyjnych,
- opracowanie algorytmu umożliwiającego porównywanie badań tribologicznych w różnych warunkach,
- przeprowadzenia badań dla większej liczby materiałów,
- wprowadzenie sztucznych sieci neuronowych do opracowywania modeli matematycznych.

Proponowane wyżej kierunki dalszych badań są w dużym stopniu zbieżne z trendami obserwowanymi w zakresie badań tribologicznych. Propozycje te wynikają z przeprowadzonych badań własnych. Potwierdzają one trafność wyboru tematyki badań.

Przedstawione problemy kształtowania cech użytkowych eksploatacyjnej warstwy wierzchniej elementów maszyn pracujących kontaktowo wskazują na konieczność stosowania równań matematycznych wiążących zależności wpływu warunków i parametrów procesu technologicznego z cechami użytkowymi, takimi jak: moment tarcia, zużycie i chropowatość powierzchni otrzymana podczas eksploatacji maszyn.

LITERATURA

[1] Abouelatta O.B., Madl L., 2001. Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations. Journal of Materials Processing Technology 118, 269-277.

[2] Abou-El-Hossein K.A., 2008. Cutting fluid efficiency in end milling of AISI 304 stainless steel. Industrial Lubrication and Tribology 60(3), 115-120.

[3] Adamczak St., Domagalski R., Sender E., 2011. Metody badań łożysk tocznych w aspekcie współczesnych wymagań wyrobów o wyższych parametrach eksploatacyjnych. Tribologia 6, 11-18.

[4] Adamczak St., Domagalski R., Sender E., 2011. Moment oporowy w łożyskach tocznych – metody i urządzenia badawcze. Tribologia 6, 19 -28.

[5] Adarsh Kumar K., Ratnam Ch., Murthy B., Satish Ben B., Raghu Ram Mohan Reddy K., 2012. Optimization of surface roughness in face turning operation in machining of EN-8. International Journal of Engineering Science & Advanced Technology 2, 807-812.

[6] Arasimowicz A., Piekarski R., 2011. Pomiar naprężeń własnych metodą usuwania warstw w technologicznych warstwach wierzchnich. Postępy Nauki i Techniki 6, 5-13.

[7] Bak M., Libera M., Jóska M., 2012. Wpływ warunków smarowania na zmiany struktury geometrycznej powierzchni elementów łożysk tocznych. Tribologia 4, 11-16.

[8] Bartoszewicz A., Radziejewska J., Starzyński G., Musialik J., 2002. Ewaluation of geometrical structure and contact stiffness of surfaces after electromechanical burnishing. Advances in Manufacturing Science and Technology 26(3), 5-23.

[9] Bąkowski H., Witaszek M., 2008. Ocena zużycia stali szynowej bez i po obróbce cieplnej w skojarzeniu toczno-ślizgowym. Tribologia 2, 43-50.

[10] Bezjazichny V., 1994. Calculation of cutting conditions satisfying specified requirements to the surface layer quality and cutting accuracy. EUROMETAL WORKING'94, Udine (Italy), 0891-0798.

[11] Biel M., 2006. Mikrostruktura i właściwości biomateriałów tytanowych po obróbce powierzchniowej. Rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza Kraków.

[12] Bielawski P., 2003. Diagnozowanie maszyn z wykorzystaniem mocy tarcia. Diagnostyka 29, 15-20.

[13] Blunt L., Jiang X., 2003. Advanced Techniques for Assessment of Surface Topography. Kogan Page London.

[14] Boryczko A., 2002. Measurement of relative tool displacement to the workpiece for the assessment of influences of machining errors on surface profiles. Measurement 31, 93-105.

[15] Brinksemeier E., 1982. Residual stresses – measurement and causes in machining processes. Annals of CIRP 31(2), 59-63.

[16] Burakowski T., 1996. Inżynieria powierzchni wczoraj, dziś i jutro. Inżynieria Powierzchni 1, 3-10.

[17] Burakowski T., 1998. Rozwój inżynierii powierzchni a rozwój inżynierii eksploatacji. Tribologia 5, 829-843.

[18] Burakowski T., 2004. Rozważania o synergizmie w inżynierii powierzchni. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej.

[19] Burakowski T., 2007. Areologia. Powstanie i rozwój. Instytut Technologii Eksploatacji Radom.
[20] Burakowski T., Marczak R., 1995. Eksploatacyjna warstwa wierzchnia. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn 3, 328-337.
[21] Burakowski T., Marczak R., 1999. Wybrane procesy konstytuowania się eksploatacyjnej warstwy wierzchniej. Tribologia 6, 757-765.
[22] Burakowski T., Wierzchoń T., 1995. Inżynieria powierzchni metali. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa.
[23] Byrne G., Dornfeld D., Denkena B., 2003. Advancing cutting technology. Annals of the CIRP 2, 483-507.
[24] Che-Harona C.H., Jawaid A., 2005. The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6% Al-4% V. Journal of Materials Processing Technology 166, 188-192.
[25] Czichos H., Becker S., Lexow J., 1989. International multilaboratory sliding wear tests with ceramic and steel. Wear 135, 171-191.
[26] Davim J.P., 2001. A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using of experiments. Journal of Materials Processing Technology 116, 305-308.
[27] Dawson T.G., 2002. Machining hardened steel with polycrystalline cubic boron nitride cutting tools. PhD thesis. Georgia Institute of Technology.
[28] Dhar N.R., Kamruzzaman M., Ahmed M., 2006. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel. Journal of Materials Processing Technology 172, 299-304.
[29] Dhar N.R., Paul S., Chattopadhyay A.B., 2001. The influence of cryogenic cooling on tool wear, dimensional accuracy finish in turning AISI 1040 nad E4340C steels. Wear 249, 932-942.
[30] Dietrych J., 1985. System i konstrukcja. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa.
[31] Dobrzański L. A., 2002. Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Gliwice-Warszawa.
[32] Dong W.P., Sulivan P.J., Stout K.J., 1993. Comprehensive. Study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography. Wear 167(1), 9-21.
[33] Dunaevsky V.V., 1986. Measurement of local microscopic wear. ASME J. Tribology 108, 35-41.
[34] Farias A., Delijaicov, Batalha G.F., 2010. Surface integrity functional analysis in hard turning AISI 8620 case hardened steel through 3D topographical measurement. Archives of Materials Science and Engineering 48, 47-52.
[35] Feng J., 2001. An experimental study of the impact of turning parameters on surface roughness. Proceedings of the 2001 Industrial Engineering Research Conference, Institute of Industrial Engineers, Paper No. 2036, 1-6.
[36] Feng J., Wang D., 2002. Development of empirical models for surface roughness prediction in finish turning. Journal of Advanced Manufacturing Technology 20, 348-356.
[37] Ghani A.K., Chowdhury I.A., 2002. Study of tool life, surface roughness and vibration in machining nodular cast iron with ceramic tool. Journal of Materials Processing Technology 127, 17-22.
[38] Giessler J., 2004. Cut-and-dried technology. Machinery 162, 6-7.

[39] Gołąbczak A., Skrzypek St., Święcik R., 2008. Ocena struktury geometrycznej powierzchni i naprężeń własnych w procesie elektroerozyjnego szlifowania węglików spiekanych. Wybrane problemy obróbki ściernej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Krakowskiej Bochnia, 425-434.
[40] Gołąbczak A., Święcik R., 2009. Elektroerozyjne szlifowanie stopu tytanu. Inżynieria Maszyn 1, 19-28.
[41] Gołąbczak A., Święcik R., 2009. Ocena stanu warstwy wierzchniej stopu tytanu po szlifowaniu elektroerozyjnym. Prace Naukowe Szkoły Naukowej Obróbek Erozyjnych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 59-66.
[42] Gołąbczak A., Święcik R., 2012. Wpływ warunków szlifowania AEDG stopów tytanu na temperaturę i stan naprężeń własnych w warstwie wierzchniej. [W:] Problemy i tendencje rozwoju obróbki ściernej, red. P. Cichosza, Wrocław, 100-106.
[43] Górecka R., 1995. Teoria i technika eksperymentu. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
[44] Grzesik W., 1996. A revised model for predicting surface roughness in turning. Wear 194, 143-148.
[45] Grzesik W., 1998. Podstawy skrawania materiałów metalowych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa.
[46] Grzesik W., 2011. Polepszanie jakości technologicznej i użytkowej części z materiałów utwardzonych. Mechanik 8-9, 650-654.
[47] Hachiya K., Yui H., Shoda Y., Yokoi S., Naka M., 1997. Evaluation of Tribological Properties of Synthetic Lubricants under High Temperature and High Speed Conditions. Proceedings of Ist World Tribology Congress. Mechanical Engineering Publications Ltd. London, 33.
[48] Handzel-Powierża Z., 1990. Warstwa wierzchnia i problemy jej identyfikacji. Wybrane problemy tribologii. PWN Warszawa, 317-326.
[49] Harasymowicz J., Miernikiewicz A., Przybylski L., 2001. Possibility of controlling the final stress in the surface layer after grinding. Archives of Civil and Mechanical Engineering 1(1), 63-69.
[50] Harasymowicz J., Wantuch E., Lutze H.G., 1991. Jakość warstwy wierzchniej kształtowanej obróbką magnetościerną. Mechanik 8-9, 301-303.
[51] Hascahk A., Caydas U., 2008. Optimization of turning parameters for surface roughness and tool life based on the Taguchi method. Journal of Advanced Manufacturing Technology 38, 896-903.
[52] Hennrich G., 1998. Trockenbearbeitung die – umweltfreundliche Fertigungs-technik. Werkstattstechnik 9-10, 337.
[53] Hussain, M.I., Taraman K.S., Filipovic, A.J., Garrn, I., 2008. Experimental study to analyses the workpiece surface temperature in deep hole drilling of aluminium alloy engine blocks using MQL technology. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 2, 485-490.
[54] Hutchings I.M., 2003. Friction and Wear of Engineering Materials. Tribology, University of Cambridge UK.
[55] Janowska E., 2006. Badania analityczne i doświadczalne istotności oraz współzależności parametrów struktur geometrycznych powierzchni. Rozprawa doktorska, Politechnika Rzeszowska.
[56] Jemielniak K., 2004. Obróbka skrawaniem. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

[57] Jeng Y., 1996. Impact of plateaued surfaces on tribological performance. Tribology Transactions 39/2, 354-361.
[58] Jeng Y., Lalonde G.A., 1992. A 3-D surface topography measurement system and its applications. SAE Paper 922347.
[59] Jeng Y., Lin Z.W., Shyu S.H., 2002. A microscopic wear measurement method for general surface. ASME J. Tribology 124, 829-833.
[60] Jiang X.Q., Scott P.J., 2003. Review of surface texture work in ISO. Proceedings of 9th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces. Halmstad University, Sweden, 261-270.
[61] Jiao Y., Lei S., Pei Z.J., Lee E.S., 2004. Fuzzy adaptive networks in machining process modeling: surface roughness prediction for turning operations. International Journal of Machine Tools & Manufacture 44, 1643-1651.
[62] Jin Ch. Wu B., Hu Y., 2012. Heat generation modeling of ball bearing based on internal load distribution. Tribology International 45, 8-15.
[63] Kaczmarek J., 1990. Analiza zmian i prognozowanie chropowatości powierzchni obrobionej w różnych odmianach szlifowania płaszczyzn. Tribologia 3, 22-25.
[64] Kaczmarek J., 1999. Zastosowanie metody SCGC do oceny technologii i prognozy użytkowania powierzchni obrabianych skrawaniem. Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej 74, 5-20.
[65] Kaczmarek J., Wojciechowski B., 1995. Zmiany w strategii eksploatacyjnej warstwy wierzchniej. Tribologia 6, 629-651.
[66] Kato K., 2000. Wear in relation to friction – a review. Wear 241, 151-157.
[67] Klocke F., Eisenblatter G., 1997. Dry cutting. CIRP Annals – Manufacturing Technology 2(46), 519-526.
[68] Korzyński M., Sęp J. 2007. Komputerowe wspomaganie badań tribologicznych. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn 3(151), 57-72.
[69] Kossakowska J. 2012. Przydatność narzędzi z płytkami samoobrotowymi do obróbki materiałów trudnoobrabialnych. Inżynieria Maszyn 17(1), 52-60.
[70] Kress D., 1998. Trockenbearbeitung und Minimalmengen-kühlschmierung. Springer.
[71] Kress D., Fleischer R., 1996. Minimale schmierung bei aufbohr- und reibwerkzeugen. Reibung mit der Bohrwand minimieren. Industrie Anzeiger 17, 38.
[72] Krzyzak Z., Pawlus P., 2006. "Zero-wear" of piston skirt surface topography. Wear 260(4-5), 554-561.
[73] Kula P., 2000. Inżynieria warstwy wierzchniej. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej.
[74] Kumar P., Jain S.C., Ray S., 2002. Study of surface roughness effects in elastohydrodynamic lubrication of rolling contacts using a deterministic model. Tribology International 34, 713-722.
[75] Kumar R., Kumar S., Prakash B., Sethuramiah A., 2000. Assessment of engine liner wear from bearing area curves. Wear 239(2), 282-286.
[76] Kuttkat B., 2001. Trockenbearbeitung senkt die Fertigungskosten. Maschinenmarkt 36, 68-73.
[77] Lai J.T., Donnely S.G., 1997. High Temperature Amine Antioxidant for Synthetic Lubricant. Proceedings of 1st World Tribology Congress. Mechanical Engineering Publications Ltd. London, 32.

[78] Latoś H., Rozwadowski W., Polasik R., 2009. Toczenie skośne stali narzędziem specjalnym z dwiema krawędziami skrawającymi. Archiwum technologii Maszyn i Automatyzacji 29(2), 31-40.
[79] Lee B.Y., Tarng Y.S., 2001. Surface roughness inspection by computer vision in turning operations. International Journal of Machine Tools & Manufacture 41, 1251-1263.
[80] Legutko S., Nosal S., 2004. Kształtowanie technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej. Ośrodek Wydawnictw Naukowych PAN Poznań.
[81] Leppert T., 2008. Badania wpływu sposobu chłodzenia i smarowania na siły skrawania podczas toczenia. [w:] Obróbka Skrawaniem – Innowacje, Kraków, 368-376.
[82] Leppert T., 2009. Zużycie ostrza w warunkach toczenia na sucho i z MQL. [W:] Obróbka Skrawaniem – Zaawansowana Technika, Bydgoszcz, 163-169.
[83] Leppert T., 2011. Kształtowanie toczeniem warstwy wierzchniej w warunkach skrawania na sucho lub z minimalnym chłodzeniem i smarowaniem ostrza. Rozprawy 151, Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego Bydgoszcz.
[84] Leszek W., 1990. Wybrane zagadnienia metrologii badań tribologicznych. Wybrane problemy tribologii. PWN Warszawa.
[85] Liang H., Craven D., 2005. Tribology in chemical-mechanical planarization. Taylor and Francis Group Publ. Boca Ranton.
[86] Libera M., 2003. Estymacja powierzchniowej trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych na podstawie stanu warstwy wierzchniej. XXVI Szkoła Tribologiczna, Łódź, 73-84.
[87] Libera M., Waligóra W., 2007. Estymacja początkowa okresu niezawodności pracy łożysk tocznych w pojazdach samochodowych na podstawie badań eksploatacyjnych. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn 2 (150), 109-119.
[88] Lin S., Chang M.F., 1998. A study on the effects of vibrations on the surface finish using a surface topography simulation model for turning. International Journal of Machine Tools & Manufacture 38, 763-782.
[89] Lin W.S., Lee B.Y., Wu C.l., 2001. Modeling the surface roughness and cutting force for turning. Journal of Materials Processing Technology 108, 286-293.
[90] Liubymov V., Oczoś K.E., 1997. Wybrane zagadnienia kształtowania nierówności powierzchni w procesach obróbkowych. Mechanik 70, 81-84.
[91] Liubymov V., Stachowicz F., 2010. Wybrane zagadnienia fizyki kształtowania struktur geometrycznych powierzchni. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
[92] M'Saoubi R., Outeiro J. C., Changeux B., Lebrun J. L., Dias M. A., 1999. Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316L steels. Journal of Materials Processing Technology 96, 225-233.
[93] Ma Z., Henein N.E., Bryzik W., Glidewell J., 1998. Break-in liner wear and piston ring assembly friction in a spark – ignited engine. Tribology Transactions 41, 497-504.
[94] Majchrowski R., Cellary A., Wieczorowski M., 2006. The high-speed measurement of surface topography – spiral sampling. [In:] Development of Mechanical Engineering as a Tool for Enterprise Logistic Progress, S. Legutko (ed.). Poznan University of Technology Publishing, 297-304.

[95] Makowska M., Matuszewska A., Grądkowski M., 2011. Migracja pierwiastków aktywnych tribologicznie z oleju smarowego do materiału węzła tarcia. Tribologia 4, 163-175.
[96] Mamalis A.G., Kundrak J., Gyani K., 2002. On the dry machining of steel surfaces using superhard tools. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 19(3), 157-162.
[97] Marinkovic V., Madic M., 2011. Optimization of surface roughness in turning alloy steel by using Taguchi method. Scientific Research and Essays, 6(16), 3474-3484.
[98] Marzec S., Pytko S., 1999. Tribologia procesów skrawania metali. Nowe ciecze chłodząco-smarujące. Wydawnictwo ITE PIB, Radom.
[99] Matsumoto K., Hashimoto F., Lahoti G., 1999. Surface integrity generated by precision hard turning. Annals CIRP 48(1), 59-62.
[100] Matthews A., Franklin S., Holmberg K., 2007. Tribological coatings: Contact mechanisms and selection. Journal of Physics: Applied Physics 40, 54-63.
[101] Matuszewski M., Musiał J., Styp-Rekowski M., 2005. Wybrane zagadnienia transformacji warstwy wierzchniej w procesie eksploatacji. Materiały Konferencji Naukowej „Mechanika 2005", Gdańsk, 161-166.
[102] Matuszewski M., Musiał J., Styp-Rekowski M., 2012. Procedura doboru warunków i parametrów procesu technologicznego w aspekcie cech eksploatacyjnej warstwy wierzchniej. Tribologia 6, 113-120.
[103] Matuszewski M., Musiał J., Styp-Rekowski M., 2012. Stopień izotropowości struktury powierzchni elementów maszyn a proces zużywania. Tribologia 6, 121-128.
[104] Michalak M., Gawroński Z., 2010. Dobór procesu nawęglania na przykładzie rolki łożyska tocznego. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji 30(3), 87-97.
[105] Michalczewski R., 2009. Wpływ konfiguracji materiałowej na odporność na zacieranie smarowanych skojarzeń z elementami pokrytymi powłoką niskotarciową. Tribologia 2, 93-106.
[106] Musialik J., 2001. Stereometria warstwy wierzchniej po nagniataniu elektrochemicznym. Materiały Konferencji Wytwarzanie elementów maszyn ze stopów metali o specjalnych właściwościach, Rzeszów-Bystre, 91-96.
[107] Musiał J., 2001. Wpływ przebiegu transformacji TWW w EWW na cechy użytkowe łożysk tocznych. Materiały Konferencyjne Kongresu Eksploatacji, Krynica, 173-179.
[108] Musiał J., 2003. Badania wpływu wybranych obciążeń zewnętrznych na zmiany geometrii powierzchni roboczych łożysk tocznych. Rozprawa doktorska Bydgoszcz.
[109] Musiał J., 2006. Influence of operational external loads on changes in surface geometrical structure of kinematic pair elements. Tribologia 3, 143-152.
[110] Musiał J., 2007. Wpływ wymuszeń zewnętrznych na parametry struktury geometrycznej powierzchni elementów łożyskowych. [w:] Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej. IBEN Gorzów Wlkp., 171-177.
[111] Musiał J., 2008. Zmiany zachodzące w warstwie wierzchniej w kolejnych fazach jej istnienia. Tribologia 3, 365-374.
[112] Musiał J., 2009. Influence of operational external loads on parameters of the surface geometric structure. Journal of Polish Cimac 4(1), 111-116.

[113] Musiał J., 2010. Wykorzystanie wybranych parametrów SGP do oceny powierzchni roboczych łożysk tocznych. Tribologia 1, 102-111.
[114] Musiał J., 2011. Surface layer transformation influenced by some operational factors. [In] Scientific basis of modern technologies: experience and prospects, Y.I. Shalapko, L.A. Dobrzanski, Khmelnitsky, Ukraina, 260-268.
[115] Musiał J., 2012. Some surface geometrical structure parameters changes generated operational external loads. The International Scientific Journal Problems of Tribology 2, 74-77.
[116] Musiał J., Styp-Rekowski M., 2004. Surface layer transformation under external extortions. International Journal of Applied Mechanics and Engineering 9, 123--128.
[117] Musiał J., Styp-Rekowski M., 2005. Optymalizacja modeli matematycznych zmian w strukturze geometrycznej powierzchni łożysk tocznych. Materiały XXII Sympozjonu PKM 3, Gdynia, 425-432.
[118] Musiał J., Styp-Rekowski M., 2006. Modelowanie zmian w strukturze geometrycznej powierzchni elementów par kinematycznych z tarciem tocznym. Problemy Eksploatacji 1, 27-34.
[119] Nadolny K., Plichta S., Plichta J., 2007. Model powstawania naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrobionego w procesie jednoprzejściowego szlifowania otworów ściernicą o strefowo zróżnicowanej budowie. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji 27(2), 25-32.
[120] Naka M., Ito H., Koizumi H., Sugimori Y., 1997. Effects of Urea Grease Composition on Seizure of Ball Bearings. Proceedings of Ist World Tribology Congress. Mechanical Engineering Publications Ltd. London, 27.
[121] Nakonieczny A., 2001. Prognozowanie i badania właściwości mechanicznych warstw powierzchniowych metali. Inżynieria Powierzchni 1, 3-16.
[122] Natarajan C., Muthu S., Karuppuswamy P., 2011. Investigation of cutting parameters of surface roughness for a non ferrous material using artificial neural network in CNC turning. Journal of Mechanical Engineering Research 3(1), 1-14.
[123] Nosal S., 1998. Tribologiczne aspekty zacierania się węzłów ślizgowych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
[124] Nowicki B., 2007. Zaawansowane metody opisu i pomiarów struktury geometrycznej powierzchni. Mechanik 1, 36-41.
[125] Nyc R., 2001. Ocena zużycia współpracujących powierzchni elementów maszyn na podstawie krzywych nośności. Tribologia 3, 349-355.
[126] Oakham M., 2000. Tails you win. Metalworking Production 11, 67-70.
[127] Oczoś K.E., 1998. Postęp w obróbce skrawaniem II. Obróbka na sucho i ze zminimalizowanym smarowaniem. Mechanik 5-6, 307-318.
[128] Oczoś K.E., 2004. Doskonalenie strategii chłodzenia i smarowania w procesach obróbkowych. Mechanik 10, 597-606.
[129] Oczoś K.E., Bucior J., 1990. Wybrane aspekty technologicznych metod kształtowania niezawodności elementów maszyn pracujących kontaktowo. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn 1(81), 55-63.
[130] Oczoś K.E., Liubimov V., 2003. Struktura geometryczna powierzchni. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
[131] Oczoś K.E., Liubimov V., 2008. Rozważania nad istotnością parametrów struktury geometrycznej powierzchni w układzie 3D. Mechanik 3, 129-137.

[132] Oczoś K.E., Lubimow V., Łabudzki R., 2000. Zagadnienia morfologiczne kształtowania struktury geometrycznej powierzchni o charakterze mieszanym. Materiały Międzynarodowej Konferencji Naukowej Obróbka materiałów, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 211-221.
[133] Ohlsson R., Rosen B.G., Westberg J., 2003. The interrelationship of 3D surface characterisation techniques with standarised 2D techniques. Advanced Techniques for Assessment Surface Topography, London and Sterling, 198-220.
[134] Olszak W., 2008. Obróbka skrawaniem. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa.
[135] Oprzędkiewicz J., 1989. Podstawy niezawodności obrabiarek i systemów produkcyjnych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa.
[136] Orrego D.A.F., Jimenez L.B.V., Atehortua J.D.E., Ochoa D.M.L., 2010. Effect of the variation of cutting parameters in surface integrity in turning processing of an AISI 304 austenitic stainless steel. First International Brazilian Conference on Tribology "TriboBR", 434-446.
[137] Outeiro J.C., Umbrello D., M'Saoubi R., 2006. Experimental and numerical modeling of the residual stresses induced in orthogonal cutting of AISI 316L steels. International Journal of Machine Tools & Manufacture 46, 1786-1794.
[138] Ozimina D., 2002. Przeciwzużyciowe warstwy wierzchnie w układach tribologicznych. Rozprawy 33. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej Kielce.
[139] Ozimina D., Styp-Rekowski M., 1998. Evaluation of ZnDTP tribochemical reactivity by means of electrochemical simulation. Proceedings of 8th International Conference on Tribology NORDTRIB'98, vol. 1. DTI Tribology Centre, Aarhus (Denmark), 121 -130.
[140] Özel T., Karpat Y., 2003. Prediction of surface roughness and tool wear in finish dry hard turning using back propagation neural networks. Proc. 17th International Conference on Production Research, Blacksburg.
[141] Pawlus P., 2005. Topografia powierzchni. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
[142] Pawlus P., Grabon W., 2008. The method of truncation parameters measurement from material ratio curve. Precision Engineering 32(4), 342-347.
[143] Perry A., Sue J.A., Martin P.J., 1996. Practical measurement of the residual stress in coatings. Surface and Coating Technology 81, 17-28.
[144] Pertek A., Kulka M., Jankowiak M., Jóźwiak K., Nowak I., 2002. Wpływ obróbki laserowej po borowaniu i nawęglaniu na strukturę i właściwości stali konstrukcyjnych. Inżynieria Powierzchni 2, 16-25.
[145] Peters J., Bryan J.B., Estler W.T., Evans C., Kunzmann H., Lucca D.A., Sartori S., Sato H., Thwaite E.G., Vanherck P., Hocken R.J., Peklenik J., Pfeifer T., Trumpold H., Vorburger T.V., 2001. Contribution of CIRP to the development of metrology and surface quality evaluation during the last fifty years. Annals of CIRP 50(2), 471-488.
[146] Petropoulos G.P., Pandazaras C.N., Davim J.P., 2010. Surface Texture Characterization and Evaluation Related to Machining. Surface Integrity in Machining, 2-66.
[147] Petropoulos G.P., Torrance A.A., Pandazaras C.N., 2003.Abbott curves characteristics of turned surfaces. International Journal Of Machine Tools and Manufacture 43(3), 237-243.

[148] Piekoszewski W., 2009. Wpływ na powierzchniową trwałość zmęczeniową wybranych materiałów i technologii konstytuowania warstw powierzchniowych elementów węzła tocznego. Tribologia 3, 185-196.
[149] Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszyński W., 2001. The action of lubricants under extreme pressure conditions in a modified four-ball tester. Wear 249, 188-193.
[150] Piekoszewski W., Szczerek M., Wiśniewski, M., 2000. Charakterystyki tribologiczne chropowatości powierzchni elementów maszyn. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn 3(123), 43-69.
[151] Płonka St., 2007. The influence of selected parameters of finish turning of copper on the surface roughness. Advances in Manufacturing Science and Technology 31(4), 7-19.
[152] Polański Z., Górecka R., 1983. Metrologia warstwy wierzchniej. Wydawnictwa Naukowo-Technicze Warszawa.
[153] Popke H., Emmer Th., Steffenhagen J., 1999. Environmentally clean metal cutting process-Machining on the way to dry machining. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 1, 329-332.
[154] Przybyłowicz K., 1996. Metaloznawstwo. Wydawnictwa Naukowo-Technicze Warszawa.
[155] Pytko S., 1989. Podstawy tribologii i techniki smarowniczej. Skrypty uczelniane 1164. Wydawnictwo AGH Kraków.
[156] Pytlak B., 2010. The influence of cutting parameters on the surface texture of 18CrMo4 hardened steel. Advances in Manufacturing Science and Technology 34(4), 55-69.
[157] Pytlak B., 2011. The Roughness parameters 2D and 3D and some characteristics of the machined surface topography after hard turning and grinding of hardened 18CrMo4 steel. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji 31(4), 49-58.
[158] Rodriguez V., Sukumaran J., Ando M., De Baets P., 2011. Roughness Measurement problems in tribological testing. Sustainable Construction and Design, 115-121.
[159] Rudnick L.R., 2009. Lubricant additives: Chemistry and applications. CRC Press (Taylor &Francis) New York.
[160] Sadowski J., 1997. Termodynamiczne aspekty procesów tribologicznych. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej.
[161] Saï K., Bouzid W., 2005. Roughness modeling in up-face milling. Advanced Manufactured Technology 26, 324-329.
[162] Samson S. Lee, Chen Joseph C., 2003. On-line surface roughness recognition system using artificial neural networks system in turning operations. Journal of Advanced Manufacturing Technology 22, 498-509.
[163] Sita Rama Raju K., Rajesh S., Rama Murty Raju P., 2012. Prediction of surface roughness in turning process using soft computing techniques. International Journal of Applied Sciences and Engineering Research 1(2), 39-46.
[164] Skrzypek S.J., 2002. Nowe możliwości pomiaru makronaprężeń własnych materiałów przy zastosowaniu dyfrakcji promieniowania X w geometrii stałego kąta padania. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne Kraków.
[165] Stachowiak G.W., Batchelor A.W., Stachowiak G.B., 2004. Experimental methods in tribology. Elsevier B.V., Tribology 44.

[166] Stegemann B., Santner E. 2006. Tribological measurements at the nanoscale. Automotive and Industrial Lubrication. Proceedings of 15th International Colloquium Tribology, Esslingen.
[167] Stodolnik B., Tubielewicz K., 1999. Naprężenia w warstwie wierzchniej elementów łożysk tocznych. Tribologia 5, 657-664.
[168] Storch B., 2006. Zjawiska przykrawędziowe i monitorowanie chropowatości powierzchni po obróbce jednoostrzowej. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej.
[169] Stout K.J., Sullivan P.J., Dong W.P., Mainsah E., Luo N., Mathia T., Zahouani H., 1993. The development of methods for the characterization of roughness in three dimensions. Publication EUR 15178 EN Commission of the European Communities.
[170] Styp-Rekowski M., 2001. Znaczenie cech konstrukcyjnych dla trwałości skośnych łożysk kulkowych. Rozprawy 103. Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej Bydgoszcz.
[171] Styp-Rekowski M., 2002. Opory ruchu w łożyskach tocznych. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn 1, 7-19.
[172] Styp-Rekowski M., 2003. Znaczenie smarowania w procesie eksploatowania tocznej pary kinematycznej. Tribologia 5, 329-340.
[173] Styp-Rekowski M., 2004. Zagadnienia tribologiczne w budowie obrabiarek skrawających. Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej Bydgoszcz.
[174] Styp-Rekowski M., Musiał J., 2000. Transformacja technologicznej warstwy wierzchniej w eksploatacyjną w parze kinematycznej z tarciem tocznym. Problemy Eksploatacji 3(38), 241-248.
[175] Styp-Rekowski M., Musiał J., 2006. Procesy zużywania towarzyszące tarciu tocznemu. Problemy Eksploatacji 3, 189-199.
[176] Styp-Rekowski M., Ozimina D., Musiał J., 2007. Środowiskowe uwarunkowania smarowania tocznych węzłów łożyskowych. Tribologia 1, 199-210.
[177] Sułek M., Zięba M., 2009. Polietery silikonowe jako efektywne dodatki modyfikujące właściwości smarne wody. Tribologia 3, 247-256.
[178] Suresh P.V.S., Venkateswara R., Deshmukh S.G., 2002. A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model. International Journal of Machine Tools & Manufacture 42, 675-680.
[179] Szablewski P., Kawalec M., 2005. Mikronierówności powierzchni obrobionej stopu Inconel 718 po procesie toczenia. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej 2, 93-102.
[180] Szala J., 1989. Obciążenia i trwałość zmęczeniowa elementów maszyn. Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej Bydgoszcz.
[181] Szczerek M., 1997. Tribologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. Instytut Technologii Eksploatacji Radom.
[182] Szczerek M., Wiśniewski M., 2000. Tribologia i tribotechnika. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji PIB Radom.
[183] Terry A.J., Brown C.A., 1997. A comparison of topographic characterization parameters in grinding. Annals of CIRP 46(1), 497-500.
[184] Thomas T. R., 1982. Rough Surface. Longman New York.

[185] Vorburger T.V., Dagata J.A., Wilkening G., Iizuka K., 2002. Characterization of surface topography. [In:] Beam effects, surface topography, and depth profiling in surface analysis methods of surface characterization 5, Kluwer Academic Publishers, 275-354.
[186] Waikar R. A., Guo Y. B., 2008. A comprehensive characterization of 3D surface topography induced by hard turning versus grinding. Journal of Materials Processing Technology 197, 189-199.
[187] Waligóra W., 2002. Rozrzut powierzchniowej trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
[188] Wang W., Wong P.L., 2000. Wear volume determination during running -in for PEHL contact. Tribology International 33, 501-506.
[189] Weck M., Brecher C, Hanrath G., 1996. Probleme auf dem Weg zur olfreien Werkzeugmaschine. Spanendes Trockenbearbeiten. Technische Rundschau 48, 22-24.
[190] Weinert K., Inasaki I., Sutherland J.W., Wakabayashi T., 2004. Dry machining and minimum quantity lubrication. CIRP Annals-Manufacturing Technology 53(2), 511-537.
[191] Whitehouse D.J., 1994. Handbook of surface metrology. Institute of Physics Bristol and Philadelphia.
[192] Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J., 2003. Przewodnik po pomiarach nierówności powierzchni czyli o chropowatości i nie tylko. Politechnika Poznańska.
[193] Williams J., 2006. Engineering Tribology. Cambridge University Press New York.
[194] Witaszek M., Bąkowski H., 2007. The influence of dry, rolling – sliding friction conditions on the wear of a rail steel mated with hardened tyre steel. Tribologia 3, 389-400.
[195] Woropay M., 1996. Podstawy racjonalnej eksploatacji maszyn. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji Radom.
[196] Zawada-Tomkiewicz A., 2007. Estimation of surface roughness parameters on a base of machined surface image. Advances in Production Engineering APE, 370-377.
[197] Zawada-Tomkiewicz A., 2010. Estimation of surface roughness parameter based on machined surface image. Metrology and Measurement Systems XVII 3, 493-504.
[198] Zawada-Tomkiewicz A., Storch B., 2008. Analiza obrazu powierzchni obrobionej w obróbce na sucho ostrzami o modyfikowanej geometrii. [w:] Obróbka Skrawaniem – Innowacje Kraków, 320-327.
[199] Zwierzycki W., Grądkowski M., 2000. Fizyczne podstawy doboru materiałów na elementy maszyn współpracujących tarciowo. Instytut Technologii Eksploatacji Radom.
[200] Zwirlein O., Schlicht H., 1982. Rolling contact fatigue mechanisms-accelerated testing versus field performance. Rolling contact fatigue testing of bearing steels. ASTM STP 771, 358-379.
[201] Żarski T., 2003. Obróbka na sucho stopów magnezu. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika 61(202), 177-182.
[202] Żółtowski B., 1996. Podstawy diagnostyki maszyn. Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej Bydgoszcz.

[203] Żółtowski B., Niziński S., 2002. Modelowanie procesów eksploatacji maszyn. Wydawnictwo MARKAR – BZ Białe Błota.

[204] Żurawski Ł., Storch B., 2008. Powierzchnia po frezowaniu na sucho ostrzami do obróbki gładkościowej. [w:] Obróbka Skrawaniem – Innowacje. Wydawnictwo Instytutu Zaawansowanych Technologii Wytwarzania Kraków, 336-343.

[205] Żurek K., Slawik J., Subbotko R., 2008. Chłodzenie mgłą olejową – porównanie aspektów technicznych i ekonomicznych z technologią tradycyjną na przykładzie obróbki kutych wałów korbowych. [w:] Obróbka Skrawaniem – Innowacje, Wydawnictwo Instytutu Zaawansowanych Technologii Wytwarzania Kraków, 84-93.

ZNACZENIE TOPOGRAFII POWIERZCHNI W TRANSFORMACJI WARSTWY WIERZCHNIEJ WALCOWYCH PAR TOCZNYCH

Streszczenie

Monografia dotyczy zagadnień związanych z parami kinematycznymi z przewagą tarcia tocznego. Znajomość stanu warstwy wierzchniej umożliwia racjonalne sterowanie procesem użytkowania maszyny. W wyniku tego możliwe jest zwiększenie trwałości maszyny oraz zmniejszenie jej awaryjności.

Celem pracy jest poznanie relacji między parametrami technologicznymi procesu wytwórczego a wielkościami opisującymi cechy użytkowe warstw wierzchnich w tocznych węzłach tribologicznych w okresie ich docierania.

Określono najistotniejsze wymuszenia zewnętrzne, mające wpływ na zmiany zachodzące w WW na każdym etapie jej istnienia. Dokonano podziału transformacji warstwy wierzchniej na dwa etapy, gdyż w każdym z nich proces ten determinują inne czynniki.

Pierwszy z nich dotyczył analizy technologicznej warstwy wierzchniej dokonanej dla powierzchni bieżni walcowego łożyska tocznego. Przeprowadzone badania eksperymentalne pozwoliły na określenie wpływu parametrów obróbki skrawaniem, bez stosowania cieczy chłodząco-smarujących, na topografię otrzymanych powierzchni. Wyniki umożliwiły wyznaczenie sterowalnych parametrów struktury geometrycznej powierzchni w procesie toczenia i opracowanie modeli matematycznych, które w badanym zakresie zmiennych pozwalają na wyznaczenie tych relacji.

Drugi etap – badania eksploatacyjne przeprowadzono na tribotesterze typu AMSLER, dla skojarzenia ze stykiem skoncentrowanym – liniowym. Zaproponowano metodę pomiaru zużycia liniowego opartą na analizie wykresów krzywych nośności. Na podstawie otrzymanych wyników określono wpływ wymuszeń eksploatacyjnych na intensywność zużywania, moment tarcia i na wartość parametrów chropowatości w układzie 3D.

Efektem końcowym są zaproponowane zależności matematyczne pozwalające na określenie wpływu zmian wartości parametrów technologicznych na zmiany cech eksploatacyjnych warstwy wierzchniej w okresie docierania par kinematycznych z przewagą tarcia tocznego. Umożliwi to również takie projektowanie par kinematycznych, że spełniać one będą zadane funkcje na założonym poziomie.

W podsumowaniu zawarto wnioski podzielone na trzy grupy określające możliwość ich wykorzystania. Stanowią one również potwierdzenie zrealizowania założonego na wstępie celu monografii.

SIGNIFICANCE OF SURFACE TOPOGRAPHY IN THE SURFACE LAYER TRANSFORMATION OF THE ROLLING KINEMATIC PAIRS

Summary

The trial relates to the questions of kinematic pairs with the rolling friction superiority. The knowledge of the surface layer condition enables to efficient process operating of machine engine usage. As results of these operations the machine engine durability increasing and accident indicators decrease.

The main aim of the work is relationship recognition between the technological parameters of the productive process and quantities describing the usable properties of tribological kinematic pairs surface layer.

The most essential external loads were qualified that having influence on changes drawing ahead in surface layer on every stage of their existence. The surface layer transformation division was executed on two separate stages, because in every one stage the different factors determine this process.

First of them related to the surface layer technological analyses executes for surfaces of rolling bearing surface. Conducted experimental investigations allowed to qualification of the machining parameters influence, without applying the cutting liquids, on the topography of received surfaces. These results allowed to marks the operating parameters of geometrical surface during machining process and mathematical models elaboration which allow to delimitation these relations in studied range of variables.

Second stage – the exploitation investigations were conducted on the Amsler`s tribotester, for contacts in concentrated line contact. Proposed methodology of investigation related to marking of line waste with analysis of bearing power graph. Basis on the received results of investigations the influence of exploational loads was qualified on the moment of the friction and the value of roughness parameter in 3D arrangement.

Proposed mathematical dependences are the final effect that allowing to the qualification process of the technological parameters value changes that influence on the exploational properties of kinematic pairs with the rolling friction superiority changes. This will also make possible such kinematic pairs projecting, that they will fulfil set functions on the establish level.

In the paper recapitulation were contained conclusions divided on three groups that describing their utilization possibility. They also make up confirmations of put into effect the aim of this paper presented in introduction.