UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNO-PRZYRODNICZY
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

ROZPRAWY NR 170

Maciej Matuszewski

KIERUNKOWOŚĆ STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI W TRANSFORMACJI WARSTWY WIERZCHNIEJ

BYDGOSZCZ – 2013

REDAKTOR NACZELNY
prof. dr hab. inż. Józef Flizikowski

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

OPINIODAWCY
dr hab. inż. Dariusz Ozimina, prof. nadzw. PŚl.
prof. dr hab. inż. Tadeusz Zaborowski

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE
mgr Aleksandra Górska, mgr Tomasz Szałajda

© Copyright
Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
Bydgoszcz 2013

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.

Praca powstała przy wsparciu projektu
„Realizacja II etapu Regionalnego Centrum Innowacyjności”
współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego
w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego
Województwa Kujawsko-Pomorskiego na lata 2007-2013

ISBN 978-83-64235-00-9
ISSN 0209-0597

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
ul. Ks. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz, tel. 52 3749482, 3749426
e-mail: wydawucz@utp.edu.pl http://www.wu.utp.edu.pl

Wyd. I. Nakład 88 egz. Ark. aut. 10,8. Ark. druk. 10,6.
Oddano do druku i druk ukończono we wrześniu 2013
Uczelniany Zakład Małej Poligrafii UTP Bydgoszcz, ul. Ks. A. Kordeckiego 20

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów stosowanych w pracy 5

1. GENEZA I PROBLEMATYKA PRACY 7

2. TRANSFORMACJA WARSTWY WIERZCHNIEJ 10
2.1. Wielkości opisujące stan warstwy wierzchniej 10
2.2. Warstwa wierzchnia elementów maszyn w poszczególnych fazach cyklu ich istnienia 25
2.2.1. Transformacja technologicznej warstwy wierzchniej 27
2.2.2. Transformacja eksploatacyjnej warstwy wierzchniej 29
2.2.3. Relacje między transformacją technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej 32
2.3. Czynniki determinujące przebieg transformacji 35
2.3.1. Czynniki wpływające na cechy technologicznej warstwy wierzchniej 35
2.3.2. Czynniki determinujące transformację eksploatacyjnej warstwy wierzchniej 47

3. STAN WARSTWY WIERZCHNIEJ A WYBRANE CECHY UŻYTKOWE 49
3.1. Odporność na zużywanie 49
3.2. Opory ruchu 58
3.3. Problematyka oceny stanu struktury geometrycznej powierzchni 63

4. PODSUMOWANIE STUDIUM LITERATUROWEGO 70
4.1. Wnioski z analizy literatury, hipoteza naukowa 70
4.2. Cel i zakres badań 72

5. KIERUNKOWOŚĆ STRUKTURY POWIERZCHNI W BADANIACH TRIBOLOGICZNYCH 74
5.1. Metodyka badań tribologicznych 74
5.2. Program i metodyka badań 76
5.2.1. Przedmiot i obiekt badań 76
5.2.2. Model i warunki badań 80
5.2.3. Budowa i zasada działania stanowiska badawczego 86
5.2.4. Weryfikacja metodyki badawczej 90
5.3. Wyniki badań eksperymentalnych i ich interpretacja 94
5.3.1. Kierunkowość w fazie kształtowania struktury powierzchni 94
5.3.2. Stopień izotropowości struktury powierzchni w różnych warunkach współpracy 102

5.3.3. Relacje między stopniem izotropowości struktury powierzchni a wybranymi cechami użytkowymi warstwy wierzchniej 111
5.4. Analityczne badania izotropowości struktury powierzchni 124
5.4.1. Ocena jakościowa zmian struktury geometrycznej powierzchni 124
5.4.2. Modele predykcyjne – statystyczne opracowanie wyników badań 135

6. WNIOSKI I PODSUMOWANIE 143
6.1. Wnioski poznawcze 143
6.2. Wnioski utylitarne 144
6.3. Kierunki dalszych badań 145
6.4. Podsumowanie 146

LITERATURA 147

STRESZCZENIA 169

Wykaz ważniejszych oznaczeń i akronimów stosowanych w pracy

α	–	kąt skojarzenia (przecięcia) charakterystycznych śladów obróbki (kierunkowość struktury), º,
a_p	–	głębokość szlifowania, mm,
Δl	–	zmiana (ubytek) wymiaru liniowego, μm,
Δm	–	zmiana (ubytek) masy, mg,
F	–	siła obciążająca, N,
F_{obl}	–	współczynnik regresji,
H	–	twardość tworzywa konstrukcyjnego, HRC,
Iz	–	stopień izotropowości, %,
L	–	droga tarcia, m,
R	–	współczynnik korelacji wielokrotnej,
R^2	–	współczynnik determinacji,
Ra	–	średnia arytmetyczna rzędnych profilu, μm,
Rpk	–	zredukowana wysokość wzniesienia profilu chropowatości, μm,
Rt	–	całkowita wysokość profilu, μm,
Rq	–	średnia kwadratowa rzędnych profilu, μm,
s	–	błąd standardowy regresji,
v	–	prędkość ruchu względnego, $m \cdot min^{-1}$,
v_{ft}	–	prędkość posuwu stołu, $m \cdot min^{-1}$,
v_s	–	prędkość szlifowania, $m \cdot s^{-1}$,
2 D	–	układ dwuwymiarowy,
3 D	–	układ trójwymiarowy,
CVD	–	chemiczna metoda nanoszenia powłok (*Chemical Vapour Deposition*),
E	–	obróbka z udziałem emulsji,
EWW	–	eksploatacyjna warstwa wierzchnia,
EWW_{we}	–	cechy wejściowe eksploatacyjnej warstwy wierzchniej,
MQL	–	obróbka z minimalnym chłodzeniem i smarowaniem,
PVD	–	fizyczna metoda nanoszenia powłok (*Physical Vapour Deposition*),
S	–	obróbka na sucho,
SGP	–	struktura geometryczna powierzchni,
TWW	–	technologiczna warstwa wierzchnia,
TWW_{wy}	–	cechy wyjściowe technologicznej warstwy wierzchniej,
WW	–	warstwa wierzchnia.

1. GENEZA I PROBLEMATYKA PRACY

Każdy obiekt techniczny charakteryzuje się zbiorem cech użytkowych. W przypadku maszyn ich możliwości i osiągi, np. trwałość, niezawodność, wynikają z cech reprezentowanych przez zespoły tworzące strukturę konstrukcyjną takiego obiektu. Zespoły stanowią zbiór par kinematycznych, można zatem stwierdzić, że wspomniany wyżej zbiór cech użytkowych zdeterminowany jest cechami poszczególnych par kinematycznych.

Na podstawie licznych badań [20, 87, 104, 124, 139, 183, 191, 221, 290, 291] stwierdzono, że cechy użytkowe w największym stopniu zależą od stanu warstwy wierzchniej (WW), którą konstytuuje się w całym procesie wytwórczym, szczególnie zaś od parametrów charakteryzujących strukturę geometryczną powierzchni (SGP).

Kształtowanie pożądanych cech warstwy wierzchniej już w procesie wytwarzania jest ważnym problemem ze względu na zdolności elementów par kinematycznych do spełniania jak najdłużej przewidzianych funkcji w obiekcie technicznym. Tworzona w procesie technologicznym warstwa wierzchnia współpracujących elementów ma istotny wpływ na ich cechy użytkowe, decydujące o trwałości całej maszyny; wśród nich należy wymienić: odporność na zużywanie, wytrzymałość zmęczeniową, opory ruchu, odporność na korozję itp. [35, 37, 39, 95, 97, 271]. Pamiętać przy tym należy, że procesy tribologiczne rozpatrywane są zawsze dla pary elementów – w zależności od skojarzenia inna może być intensywność procesu, a nawet jego mechanizm.

Przyczyną utraty funkcjonalności elementów tworzących węzły cierne jest ograniczona odporność ich warstwy wierzchniej na niszczące działanie wymuszeń eksploatacyjnych. Pod wpływem tych czynników (mechanicznych, cieplnych, chemicznych, elektrycznych) w czasie pracy pary ciernej następują zmiany w warstwie wierzchniej. Zmiany te na ogół powodują różny stopień utraty zdolności pracy par kinematycznych do spełniania założonych konstrukcyjnie funkcji.

Z informacji literaturowych [20, 30, 45, 46, 76, 104, 106, 183, 191, 194, 221, 290] wynika, że badania naukowe prowadzone w ośrodkach naukowych w kraju i na świecie, dotyczące warstwy wierzchniej, koncentrują się w zasadzie na dwóch obszarach tematycznych. Z jednej strony prowadzone są badania zmierzające do tego, aby poznać zjawiska zachodzące w warstwie wierzchniej podczas tarcia w czasie pracy. Z drugiej strony – przedmiotem tych badań jest nadawanie warstwie wierzchniej cech zwiększających odporność na niszczące działanie czynników zewnętrznych podczas pracy przez właściwe zaprojektowanie i przeprowadzenie procesu wytwórczego. Na tej podstawie można stwierdzić, że obszary badań warstwy wierzchniej dotyczą dwóch faz istnienia wytworu, tj. wytwarzania i eksploatacji. Podczas wytwarzania istotne jest określenie wpływu warunków i parametrów procesu technologicznego na uzyskane cechy eksploatacyjne warstwy wierzchniej. W czasie eksploatacji istotne jest natomiast poznanie mechanizmu i intensywności procesu zużywania w zależno-

ści od określonych wymuszeń. Realizując komplementarnie badania zmian w warstwie wierzchniej, powinno się podejmować działania, których wynikiem będzie określenie relacji między czynnikami technologicznymi determinującymi cechy konstytuowanej WW a eksploatacyjnymi. Poznając jak najbardziej wnikliwie prawidłowości i mechanizmy występujące podczas zużywania pary ciernej, można odpowiednio ukierunkować proces technologiczny tak, aby uzyskane użytkowe cechy warstwy wierzchniej zapewniały podczas eksploatacji możliwie małe i wolne zmiany tej warstwy, a tym samym – jak najdłuższy okres pracy z niezmienionymi, założonymi konstrukcyjnie cechami pary trącej. Gdy znane są relacje cząstkowe między wymienionymi elementami, można wyznaczyć funkcje łączące parametry procesu technologicznego realizowanego w określonych warunkach z wielkościami opisującymi cechy i stan warstwy wierzchniej. Dalsze działania analityczne pozwalają na poznanie relacji między cechami użytkowymi danego obiektu technicznego a parametrami i warunkami procesu wytwórczego.

Nadawanie pożądanych cech użytkowych warstwom wierzchnim elementów par kinematycznych, uwzględniających rzeczywiste wymuszenia eksploatacyjne, to kluczowe zagadnienie w procesie wytwórczym elementów kinematycznych par ciernych. Jednym z ważniejszych sposobów konstytuowania warstw wierzchnich jest obróbka ubytkowa powierzchni. W literaturze przedmiotu najobszerniej opisane są relacje ilościowe między stanem ukonstytuowanej w wyniku obróbki skrawaniem warstwy wierzchniej a intensywnością procesu zużywania, np. [20, 46, 49, 50, 79, 149, 184, 290]. Należy przy tym zauważyć, że do opisu tego stanu przyjmuje się przede wszystkim parametry chropowatości. Bez wątpienia są one istotne zarówno dla konforemnego, jak i niekonforemnego styku współpracujących powierzchni. Nieliczne są natomiast pozycje literaturowe, w których opisywane są relacje ilościowe (modele, równania) między uzyskaną kierunkowością śladów obróbki – szczególnie opisaną stopniem izotropowości, wynikającą bezpośrednio z kinematyki ruchów roboczych narzędzia i przedmiotu obrabianego a zmianami stanu WW zachodzącymi pod wpływem wymuszeń eksploatacyjnych. Dzieje się tak pomimo obserwowanego szybkiego rozwoju technik pomiarowych i to zarówno w sferze sprzętu [14, 106, 154, 250], jak i metodyki [65, 154, 220].

Nawet pobieżna analiza wskazuje na duże znaczenie tej cechy SGP w zagadnieniach intensywności procesu zużywania, zwłaszcza przy konforemnym styku współpracujących elementów.

Szkodliwe oddziaływanie wielu procesów technologicznych na środowisko, w tym zwłaszcza obróbki ubytkowej, implikuje dążenie do ograniczenia w jak największym stopniu lub całkowitego wyeliminowania czynników negatywnie wpływających na otoczenie pracy. W przypadku obróbki skrawaniem czynnikiem o największym znaczeniu ekologicznym jest stosowana ciecz chłodząco-smarująca. Większość badań naukowych obróbki wiórowej: na sucho, z minimalnym chłodzeniem i smarowaniem oraz z konwencjonalnym stosowaniem cieczy obróbkowych koncentruje się na zużyciu ostrza i określeniu ko-

rzystnych warunków obróbki w odniesieniu do dokładności wykonania. Nieliczne są natomiast prace nad skutkami wyeliminowania lub ograniczenia ilości cieczy chłodząco-smarującej w aspekcie uzyskiwanych cech użytkowych, determinowanych głównie uzyskaną strukturą geometryczną powierzchni.

Na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy od szeregu lat prowadzone są badania kształtowania cech użytkowych par kinematycznych przy kryteriach tribologicznych[1]. Prezentowana praca stanowi kontynuację dotychczasowych badań w przedstawionej powyżej tematyce. Przeprowadzona analiza literatury przedmiotu pozwoliła na sformułowanie tez i określenie zakresu badań. W przedstawionej rozprawie habilitacyjnej podjęto próbę usystematyzowania i rozszerzenia wiedzy dotyczącej relacji między stanem warstwy wierzchniej a zachodzącymi zmianami w tej warstwie podczas pracy, przy czym w opisie stanu warstwy wierzchniej uwzględniono przede wszystkim pomijaną często cechę – kierunkowość SGP w kontekście jej obróbki z uwzględnieniem także w pewnym stopniu uwarunkowań ekologicznych.

Wskazane znaczenie kierunkowości struktury dla intensywności procesu zużywania elementów ciernych par kinematycznych ze stykiem konforemnym było przyczyną, że ta właśnie odmiana pary została przyjęta jako badany obiekt. Uzasadnienie to wzmacnia fakt, że pary takie występują powszechnie w stosowanych rozwiązaniach konstrukcyjnych węzłów ciernych.

[1] zamieszczone w pracy rysunki i zdjęcia, pod którymi nie podano źródła, stanowią opracowanie autora lub Zakładu Inżynierii Produkcji Wydziału Inżynierii Mechanicznej UTP w Bydgoszczy

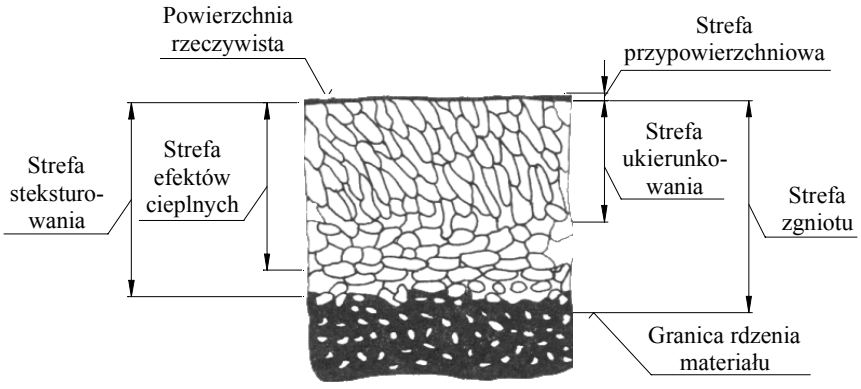
2. TRANSFORMACJA WARSTWY WIERZCHNIEJ

2.1. WIELKOŚCI OPISUJĄCE STAN WARSTWY WIERZCHNIEJ

Warstwa wierzchnia objętościowo stanowi zaledwie kilka procent całego elementu, a jednak jej cechy stereometryczne i fizykochemiczne decydują o intensywności procesu zużywania. Mechanizm i intensywność tego procesu determinują z kolei własności eksploatacyjne elementów par kinematycznych.

W źródłach literaturowych można znaleźć liczne definicje warstwy wierzchniej. Wprawdzie niekiedy różnią się między sobą, jednakże istota WW pozostaje zawsze taka sama. Zagadnienia związane z warstwą wierzchnią (terminologia, cechy, interpretacja itp.) są zawarte w Polskiej Normie [254]. W normie tej WW zdefiniowano następująco: „(...) jest to warstwa materiału ograniczona rzeczywistą powierzchnią przedmiotu, obejmująca tę powierzchnię oraz część materiału w głąb od powierzchni rzeczywistej, która wykazuje zmienione cechy fizyczne i niekiedy chemiczne w stosunku do cech tego materiału w głębi przedmiotu".

Podobnie jak liczne są w literaturze definicje warstwy wierzchniej, tak samo wiele jest sposobów przedstawienia jej budowy. Wszystkie modele WW zakładają jej budowę strefową. Najprostszym jest model 3-strefowy, a jednym z bardziej rozbudowanych np. model 9-strefowy [70], który wydaje się optymalnie rozbudowany. W modelach o większej liczbie stref nowe powstały poprzez podzielenie istniejących lub wprowadzenie dodatkowych [138]. Każda strefa ma określoną grubość (głębokość) i jest wyznaczana zakresem występowania pewnych cech WW. W większości przypadków granice poszczególnych stref nie są wyraźne. Niektóre strefy mogą w ogóle nie występować lub wzajemnie się przenikać, tworząc obszary łagodnego zanikania cech jednej strefy z jednoczesnym pojawianiem się cech drugiej. Na rysunku 2.1 przedstawiono schemat budowy warstwy wierzchniej.

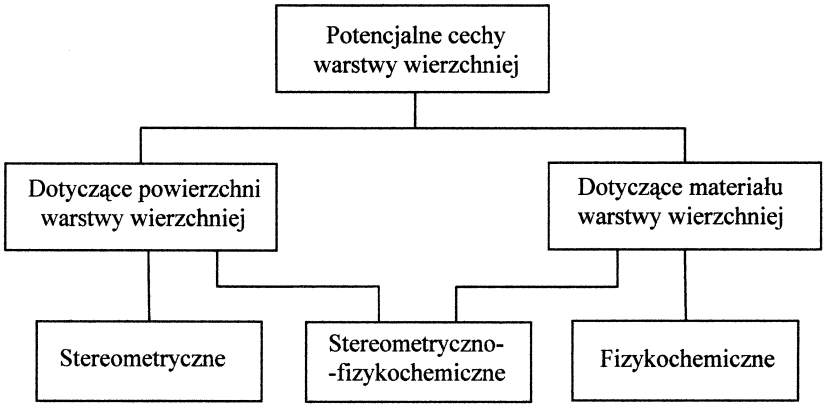


Rys. 2.1. Warstwa wierzchnia w ujęciu schematycznym [254]

Mechanizm i intensywność zjawisk tribologicznych zależy przede wszystkim od stanu warstwy wierzchniej współpracujących elementów pary kinematycznej. Zużycie tych elementów to w istocie zużycie WW, powodowane oddziaływaniem na nią wszystkich rodzajów tarcia. Liczne badania, np. [20, 46, 49, 50, 149, 190, 204, 212, 213], wykazały, że istnieje ścisły związek pomiędzy stanem warstwy wierzchniej elementów par kinematycznych a cechami tribologicznymi tych elementów. Na ich podstawie stwierdzono, że od stanu WW ukonstytuowanej w wyniku realizacji założonego procesu technologicznego zależą również skutki procesu zużywania [21, 58, 74, 83, 188, 191, 246, 259, 273, 291, 342, 358].

Warstwę wierzchnią można opisać szeregiem wzajemnie powiązanych cech. Zależności między nimi są niekiedy bardzo złożone i trudne bądź wręcz niemożliwe do jednoznacznego matematycznego zdefiniowania. Relacje jakościowe są na ogół znane, zwłaszcza w odniesieniu do cech najistotniejszych, ale związek ilościowy jest niekiedy trudny do określenia.

Warstwa wierzchnia po procesie wytwarzania – w stanie gotowości do współpracy – jest opisywana zbiorem cech potencjalnych, które można utożsamić z parametrami ogólnie zakwalifikowanymi jako: stereometryczne, stereometryczno-fizykochemiczne i fizykochemiczne [35, 39, 97, 298]. Na rysunku 2.2 przedstawiono najważniejsze potencjalne własności i właściwości warstwy wierzchniej. Należy zauważyć, że cechy te mogą występować w zróżnicowanym stopniu, jednakże nie każda WW charakteryzuje się takimi własnościami i właściwościami.



Rys. 2.2. Podstawowe potencjalne cechy warstwy wierzchniej

Cechy opisane parametrami stereometrycznymi i stereometryczno-fizykochemicznymi dotyczą fizycznej powierzchni warstwy wierzchniej, parametry fizykochemiczne i stereometryczno-fizykochemiczne dotyczą natomiast tworzywa konstrukcyjnego warstwy wierzchniej.

O własnościach i właściwościach warstwy wierzchniej w znacznym stopniu decydują parametry stereometryczne, które opisują strukturę stereometrycz-

ną powierzchni, nazywaną częściej strukturą geometryczną powierzchni (SGP) [36, 39, 50, 73, 85, 89, 341]. To one są najpowszechniej stosowane do opisu zachodzących zmian w WW. Charakteryzują się ciągłymi zmianami w trakcie procesu wytwarzania i eksploatowania, a więc dobrze opisują bieżący stan WW. Wielkości fizykochemiczne i stereometryczno-fizykochemiczne, zmieniają się w zróżnicowanym stopniu i nie w każdych warunkach tak samo. Niektóre z tych parametrów w ogóle nie ulegają zmianom, szczególnie podczas eksploatacji.

Do grupy wielkości opisujących stereometryczne ukształtowanie powierzchni, które charakteryzują stan WW, zalicza się [39, 85, 115, 219, 328, 347]:

- chropowatość,
- kierunkowość,
- izotropowość,
- okresowość,
- falistość.

Zbiór wielkości fizykochemicznych określających stan WW tworzą następujące elementy składowe:

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

Do grupy wielkości stereometryczno-fizykochemicznych przyjmuje się takie elementy składowe, jak:

- energetyczne (energia powierzchniowa, napięcie powierzchniowe);
- promienne – optyczne (emisyjność, odbijalność, pochłanialność).

Pod względem charakterystyk tribologicznych do najistotniejszych wielkości opisujących stan warstwy wierzchniej spośród zbioru cech stereometrycznych należy zaliczyć: chropowatość oraz kierunkowość powierzchni, natomiast spośród fizykochemicznych: rodzaj tworzywa konstrukcyjnego i jego budowę, naprężenia własne oraz twardość i kruchość [39, 85, 242]. Wymienione cechy opisywane są parametrycznie bądź funkcyjnie.

Jak już wcześniej zasygnalizowano, bardzo istotnymi parametrami wyznaczającymi stan warstwy wierzchniej są parametry stereometryczne, a wśród nich chropowatość oraz kierunkowość. Potwierdzeniem tego spostrzeżenia może być klasyfikacja SGP zaproponowana w pracach [225, 227, 287]. Dokonano jej według następujących kryteriów:

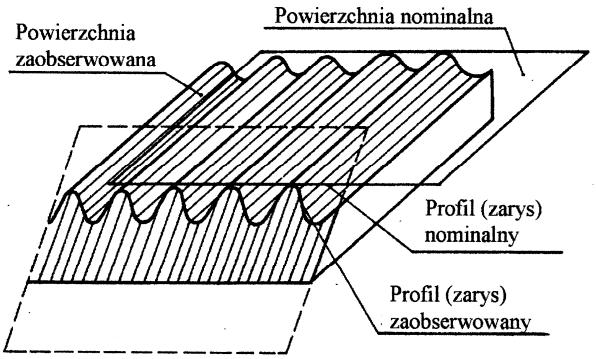
- sposobu obróbki wykończeniowej,
- wartości parametrów chropowatości,
- kierunkowości śladów obróbki (kierunkowość SGP).

Chropowatość powierzchni zdefiniowana w Polskiej Normie [253] jest określana jako zbiór nierówności powierzchni rzeczywistej, umownie określanych jako odchyłki profilu zmierzonego od linii odniesienia w granicach odcinka, na którym nie uwzględnia się odchyłek kształtu i falistości. Przyjmuje się, że o chropowatości SGP, mówi się wówczas, gdy odstęp nierówności jest około 5÷50 razy większy od ich głębokości (rys. 2.3). Chropowatość obejmuje nierówności o dużej częstotliwości i małej długości fali. Nieregularność chropowatości może być okresowa lub losowa i jest uzależniona od zastosowanej technologii wytwarzania.

Rys. 2.3. Schematyczne przedstawienie chropowatości powierzchni [329]

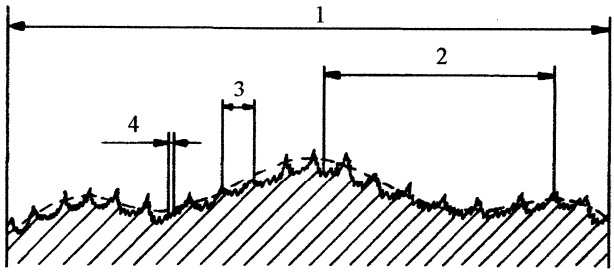
Chropowatość jest wyznaczana na podstawie profilu powierzchni (profilu chropowatości), który jest podstawowym elementem charakterystyki chropowatości powierzchni. Profil zaobserwowany (zmierzony) powierzchni stanowi profil uzyskany przez przecięcie powierzchni przedmiotu płaszczyzną o określonym położeniu względem powierzchni nominalnej (rys. 2.4). Najczęściej przecięcie jest prostopadłe do powierzchni przedmiotu lub do płaszczyzny stycznej do niej i wykonane w kierunku dającym przypuszczalnie największą odchyłkę profilu (pod kątem prostym do kierunkowości struktury powierzchni) [85, 328, 329]. Linię, która opisuje profil chropowatości, oznacza się funkcją:

$$z = f(x) \tag{2.1}$$



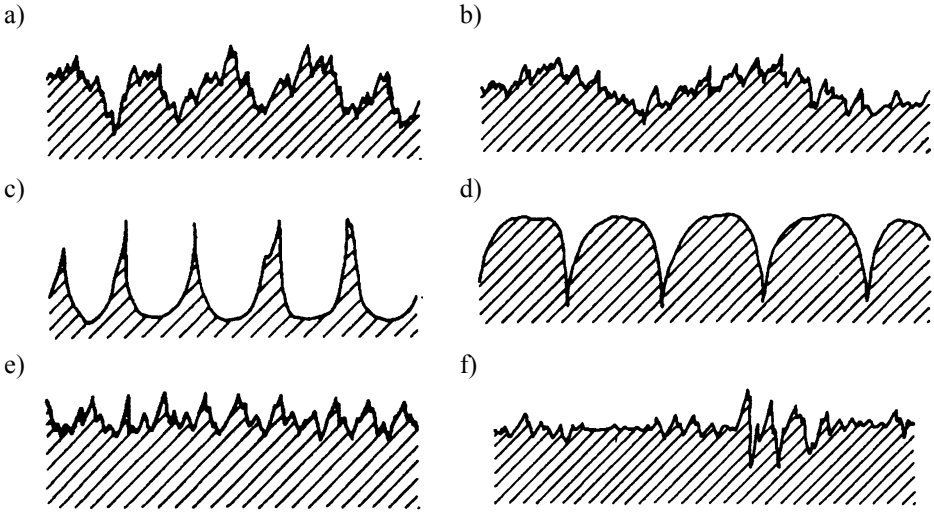
Rys. 2.4. Profil powierzchni (profil chropowatości) [329]

Na rysunku 2.5 przedstawiono obraz nierówności profilu z wyszczególnieniem klas nieregularności ze względu na skalę oddziaływania. Na rysunku 2.6 zaprezentowano natomiast różny charakter profilów chropowatości.



Rys. 2.5. Obraz nierówności profilu ze wskazanymi klasami nieregularności: 1 – odchyłka kształtu, 2 – falistość, 3 – chropowatość, 4 – mikrochropowatość [329]

Należy przy tym zauważyć, że ilościowa ocena parametryczna nie zawsze rzetelnie odzwierciedla rzeczywistą topografię powierzchni, co wyraźnie przedstawiono na rysunku 2.6.



Rys. 2.6. Różne rodzaje profilów chropowatości: a) krótkofalowy, b) długofalowy, c) z ostrymi wierzchołkami, d) z zaokrąglonymi wierzchołkami, e) okresowy, f) losowy [328]

Stosowanie do ilościowej oceny stanu analizowanej struktury powierzchni parametrów chropowatości SGP wymaga przyjęcia określonej bazy odniesienia, w stosunku do której będą one liczbowo wyznaczane. Dla pomiarów w układzie dwuwymiarowym jest to zazwyczaj linia średnia, natomiast dla pomiarów przestrzennych (3D) – powierzchnia. Parametry uzyskiwane z analizy profilu chropowatości przyjęto oznaczać następująco: R – wszystkie parametry chropowatości (*roughness*), W – parametry falistości (*waviness*), P – parametry określane z profilu pierwotnego – niefiltrowanego (*primary*), a parametry uzyskane z analizy trójwymiarowej oznacza się literą S (*surface*).

Wszystkie parametry chropowatości można zaklasyfikować do określonych grup. Spotyka się różne sposoby klasyfikacji parametrów, jednak określone grupy są charakterystyczne (np. parametry amplitudowe, odległościowe, krzywej nośności) i występują praktycznie w każdej klasyfikacji. W przypadku analizy dwuwymiarowej parametry najczęściej klasyfikuje się do czterech grup, a podczas analizy 3D przypisuje się je do pięciu grup. Parametry chropowatości, określające SGP w układzie dwuwymiarowym, zostały ujęte w normie [253] i zaklasyfikowano je do następujących grup parametrów [137, 238, 253, 310, 328, 329]:

- pionowe (amplitudowe),
- poziome (odległościowe),
- hybrydowe (mieszane),
- charakterystycznych krzywych.

Parametry pionowe były pierwszymi, które brano pod uwagę podczas analizy stanu warstwy wierzchniej. Wśród tych parametrów są takie, których wartość można odczytać bezpośrednio z profilogramu oraz takie, które oblicza się na podstawie wyników pomiarów.

Do parametrów najczęściej stosowanych w opisie samej topografii powierzchni, a także do opisu zmian stanu warstwy wierzchniej pod wpływem wymuszeń zewnętrznych przyjmuje się parametry amplitudowe (Ra, Rq, Rc, Rz, Rp, Rv, Rt) oraz te, które są wyznaczane z charakterystycznej krzywej nośności (Rk, Rpk, Rvk) – krzywej Abbotta-Firestone'a [238].

Parametr Ra (średnia arytmetyczna bezwzględnych wartości rzędnych profilu) jest najczęściej stosowanym parametrem i to zarówno w Polsce, jak i za granicą. Według [219] w stosunku do wszystkich stosowanych w przemyśle parametrów stanowi on 92% przypadków z uwagi na względną powtarzalność i stabilność. Parametr ten daje jednak ubogą informację o mierzonym profilu, jego interpretacja jest trudna do wykorzystania w praktyce, ponieważ jest parametrem uśrednionym i na tej podstawie trudno wnioskować o rodzaju profilu. Pod względem naukowym zastosowanie do oceny powierzchni parametru Rq (średniej kwadratowej wartości rzędnych profilu) jest bardziej poprawne, ponieważ ma on własności statystyczne. Jest to odchylenie średniokwadratowe, a więc jest on równy statystycznie odchyleniu standardowemu rzędnych profilu.

Do analiz charakterystyk tribologicznych stosuje się również parametr Rp (wysokość najwyższego wzniesienia profilu), który daje informację o kształcie profilu i pozwala wnioskować o odporności powierzchni na ścieranie. Małe wartości Rp w stosunku do Rv (głębokości najniższego wgłębienia profilu) charakteryzują powierzchnię o szerokich wzniesieniach i wąskich wgłębieniach (profil o zaokrąglonych grzbietach), podczas gdy duże wartości Rp wskazują na powierzchnię o ostrych wierzchołkach (profil o ostrych grzbietach), czyli o gorszej odporności na ścieranie. Parametr Rt (całkowita wysokość profilu) jest natomiast bardzo wrażliwy na występowanie pojedynczych wzniesień i wgłębień,

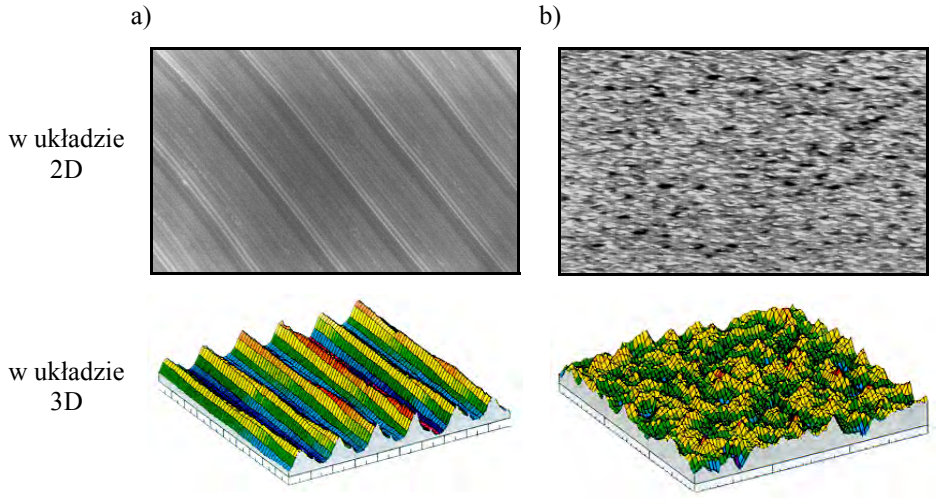
dlatego powinien być brany pod uwagę, gdy pojedyncze defekty powierzchni są niedopuszczalne.

Spośród parametrów wyznaczanych z krzywej nośności, a stosowanych do opisu SGP w aspekcie cech tribologicznych, przyjmuje się parametr Rk (zredukowaną wysokość chropowatości), który jest miarą efektywnej głębokości chropowatości po wstępnym okresie docierania, parametr Rpk (zredukowaną wysokość wzniesienia profilu chropowatości), który charakteryzuje zachowanie się powierzchni podczas docierania – mała wartość Rpk informuje o dużej odporności na ścieranie oraz Rvk (zredukowaną głębokość wgłębień profilu chropowatości). Parametr Rvk jest miarą zdolności utrzymywania oleju przez powierzchnię. Powierzchnie wymagające smarowania powinny charakteryzować się dużymi wartościami Rvk.

Parametry poziome i hybrydowe, będące połączeniem parametrów amplitudowych i odległościowych, nie mają już tak powszechnego zastosowania z racji ich trudnej interpretacji oraz uzależnienia, np. od kroku próbkowania, długości fali filtrów itp. [238].

W praktyce w zagadnieniach budowy maszyn kontakt współpracujących powierzchni to styk trójwymiarowy. Wówczas przestrzenny obraz struktury powierzchni umożliwia lepszą interpretację zachodzących zjawisk w strefie styku. Do analizy parametrycznej chropowatości w układzie 3D najbardziej powszechnie stosowane są metody profilometryczne, które polegają na zbieraniu danych pomiarowych w określonych punktach w dwu kierunkach (pojedynczych profilów) i sumowaniu tych pomiarów, co powoduje powstanie topografii powierzchni. Większość stosowanych parametrów trójwymiarowych jest rozwinięciem parametrów profilu nierówności i ich definicje są analogiczne (np. Ra → Sa, Rq → Sq, Rz → Sz, Rt → St, Rk → Sk, Rpk → Spk, Rvk → Svk, itd.).

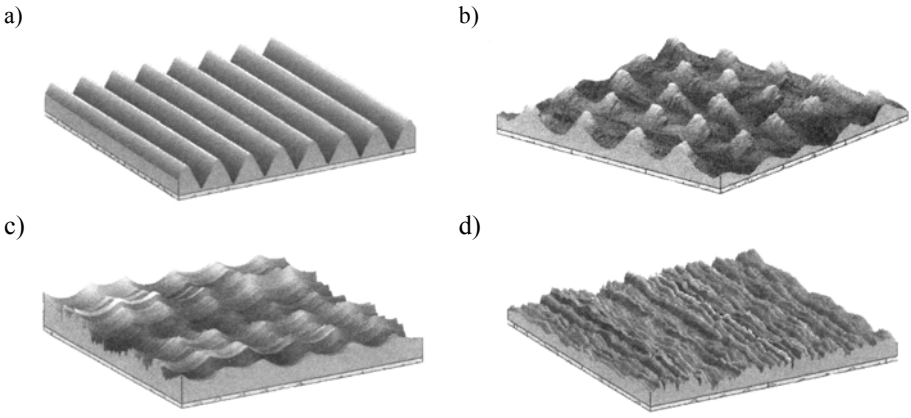
Zagadnienia dotyczące relacji między parametrami i warunkami obróbki a parametrami chropowatości są prezentowane w licznych pozycjach literaturowych [2, 25, 26, 40, 58, 61, 72, 91, 114, 123, 126, 152, 166, 193, 199, 200, 241, 285, 301, 302, 312]. Mniej liczne są publikacje, w których opisane są badania mające na celu określenie relacji między kolejną istotną cechą opisującą stereometrycznie SGP – jej kierunkowością – a transformacją WW. O kierunkowości decyduje wzajemny układ nierówności, wynikający z kinematyki procesów obróbki i zużycia. Z tego względu wszystkie powierzchnie można ogólnie podzielić na ukierunkowane i nieukierunkowane (rys. 2.7).



Rys. 2.7. Struktura geometryczna powierzchni: a) ukierunkowanej, b) nieukierunkowanej [227]

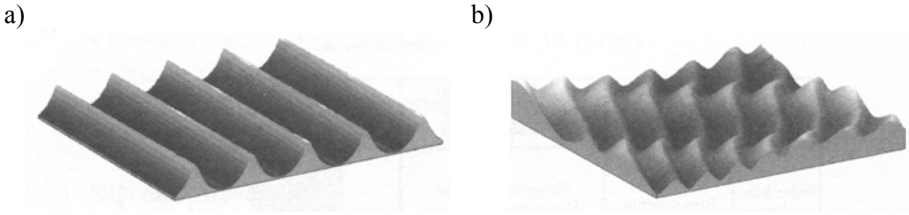
Kierunkowość struktury związana jest z izotropowością czy też jej odwrotnością – anizotropowością. Jest ona ściśle związana z technologią wytwarzania. W takim ujęciu powierzchnia może wykazywać bardzo duże zróżnicowanie z powodu śladów pozostawionych przez narzędzia skrawające oraz kinematyki narzędzia i przedmiotu obrabianego w procesie wytwarzania. Ślady obróbki są zazwyczaj wyraźne i gdy w strukturze można zaobserwować pewne kierunki uprzywilejowane, to określa się ją wówczas jako anizotropową. Jeśli takie kierunki nie występują, to strukturę określa się jako izotropową. Izotropia danego ośrodka polega na tym, że we wszystkich kierunkach wykazuje on te same cechy fizyczne lub geometryczne. Izotropowość SGP (Iz) oznacza więc jednakową strukturę powierzchni we wszystkich kierunkach. Jest to jednocześnie idealnie symetryczna struktura względem wszystkich osi symetrii. Stopień izotropowości stanowi jedną z miar kierunkowości struktury.

Powierzchnie ukierunkowane mogą być z kolei powierzchniami okresowymi lub losowymi. Dodatkowo okresowość, jak i losowość mogą występować w jednym lub wielu kierunkach (rys. 2.8).



Rys. 2.8. Ukierunkowane powierzchnie okresowe i losowe: a) okresowa jednokierunkowa, b) okresowa dwukierunkowa, c) okresowa w jednym kierunku i losowa w kierunku do niego prostopadłym, d) losowa w dwóch kierunkach [227]

Okresowość ukształtowanej struktury powierzchni może mieć formę zdeterminowaną lub niezdeterminowaną. Powierzchnie zdeterminowane charakteryzują się nierównościami o powtarzalnym kształcie i położeniu. W procesach obróbki skrawaniem najczęściej wynikają one z kinematyczno-geometrycznego odwzorowania ostrzy narzędzi – wierzchołka ostrza o określonej geometrii (promienia wierzchołka), w stałych odległościach wynikających z posuwu. Profil takiej powierzchni można określić w sposób analityczny lub doświadczalny. Okresowość niezdeterminowana (przypadkowa) powstaje w sposób nieprzewidywalny, np. wskutek występujących drgań samowzbudnych. Cechą charakterystyczną powierzchni okresowych jest sinusoidalny profil nierówności (rys. 2.9).

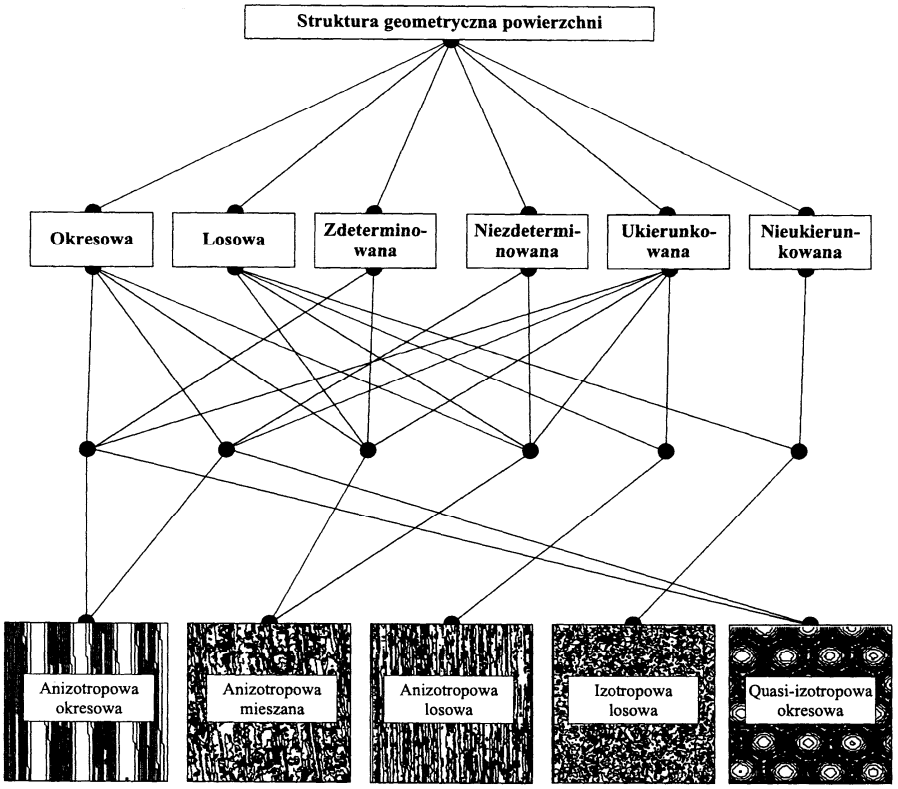


Rys. 2.9. Ukierunkowane powierzchnie okresowe: a) zdeterminowana promieniowa, b) niezdeterminowana przypadkowa [227]

Struktura geometryczna powierzchni może być kształtowana wskutek oddziaływań zdeterminowanych lub losowych bądź obu tych oddziaływań równocześnie [112, 219, 227, 229, 287]. W celu ułatwienia analizy poszczególnych powierzchni przyjęto, że o charakterze struktury decyduje współczynnik losowości profilu γ, określany jako stosunek wartości odchylenia standardowego składowej losowej rzędnych profilu σ_γ do wartości σ całego profilu. Umownie przyjęto następującą klasyfikację struktur: losową, gdy $\gamma > 0{,}7$; mieszaną:

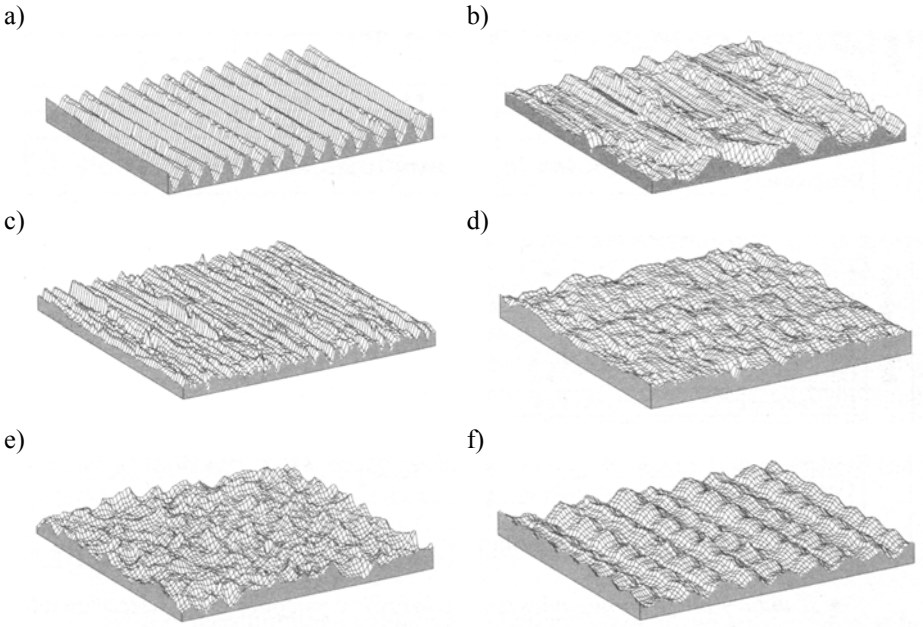
$0{,}35 \leq \gamma \leq 0{,}7$; zdeterminowaną, gdy $\gamma < 0{,}35$ [218, 227]. Gdy współczynnik przyjmuje wartość 1, to powierzchnia jest całkowicie zdeterminowana – nie występuje składowa losowa i odwrotnie: jeśli wartość wynosi 0, to powierzchnia jest całkowicie losowa – bez udziału składowej zdeterminowanej. W praktyce w procesie obróbki ubytkowej najczęściej występują jednocześnie oddziaływania zdeterminowane i losowe (odwzorowanie chropowatości krawędzi skrawającej, efekty deformacji WW, rysowania powierzchni przez wiór, oddziaływania narostu, drgania układu OUPN – obrabiarka, uchwyt, przedmiot, narzędzie; itp.), dlatego też uzyskuje się wówczas strukturę o charakterze mieszanym. W procesach obróbki ściernej, z uwagi na przypadkowe położenie i kształt ziaren ściernych, dominują oddziaływania typu losowego.

Z uwzględnieniem przedstawionych powyżej czynników charakteryzujących ukształtowanie geometryczne struktury (kierunkowości, okresowości, losowości, determinowości) wszystkie powierzchnie rzeczywiste można podzielić na: anizotropowe okresowe, anizotropowe mieszane, anizotropowe losowe, izotropowe losowe i quasi-izotropowe okresowe (rys. 2.10).



Rys. 2.10. Ukształtowanie geometryczne powierzchni [227]

Na rysunku 2.11 zaprezentowano topografię powierzchni przy uwzględnieniu jej klasyfikacji przedstawionej na rysunku 2.10.



Rys. 2.11. Charakterystyczna topografia powierzchni: a) anizotropowa okresowa, b) anizotropowa mieszana, c) anizotropowa losowa, d) losowa przejściowa między anizotropową i izotropową, e) izotropowa losowa, f) quasi-izotropowa okresowa [227]

Na podstawie przeprowadzonej analizy występowania powierzchni w budowie maszyn, przedstawionej w [227], można stwierdzić, że najczęściej powierzchnie konstrukcyjne mają strukturę anizotropową mieszaną i losową. Z reguły są to powierzchnie otrzymane poprzez obróbkę ścierną. Zauważalne jest również to, że systematycznie wzrasta udział powierzchni izotropowych losowych uzyskiwanych np. obróbką elektroerozyjną, strumieniowo-erozyjną.

W literaturze wymienia się różne miary oceny kierunkowości powierzchni. Jedna z pierwszych prac, w której oceniano izotropię [142], dotyczyła analizy mechaniki przepływu. Wykazano w niej, że ukierunkowana struktura powierzchni ma wpływ na parametry przepływu cieczy zależnie od tego, czy ślady obróbki są położone równolegle czy prostopadle do kierunku przepływu. W tej pracy oraz późniejszych, dotyczących tej tematyki, za kryterium kierunkowości struktury przyjęto [142, 237, 240] współczynnik γ:

$$\gamma = \frac{\lambda_{0,5x}}{\lambda_{0,5y}} \tag{2.2}$$

gdzie:

$\lambda_{0,5}$ – długości fali, na której wartość funkcji autokorelacji profilu zmniejsza się o połowę,

x, y – kierunki pomiaru.

Dla teoretycznej powierzchni o strukturze dokładnie poprzecznej $\gamma = 0$, natomiast o śladach dokładnie wzdłużnych $\gamma = \infty$, a dla powierzchni idealnie izotropowej $\gamma = 1$.

Najprostszą miarę izotropowości w układzie dwuwymiarowym stanowi stosunek wartości wybranych parametrów chropowatości profilu, zmierzonych dla dwóch typowych, wzajemnie się uzupełniających kierunków. Najczęściej do oceny są stosowane parametry wzdłużne i pionowe [219, 225]. Dokładniejszej oceny można dokonać przez pomiary kątowe i stosowanie długości korelacji lub też pomiary kątowe i kierunków pochylenia poszczególnych jednostkowych elementów [27, 326, 328, 330]. Wykonuje się wówczas serię pomiarów pod różnymi kątami, jakie tworzą kierunki pomiaru parametru z kierunkiem podstawowym, w którym przewidywane są wartości maksymalne parametrów amplitudowych. Najbardziej zaawansowane metody pomiaru kierunkowości SGP wykorzystują funkcje matematyczne opisu SGP, które wykazują tę zaletę w stosunku do analizy profili, że można je obliczyć z trójwymiarowych pomiarów powierzchni.

Istnieje wiele sposobów określenia poziomu izotropowości SGP na podstawie funkcji matematycznych [12, 67, 85, 170, 225, 270, 304]. W pracy [306] do określenia uprzywilejowanych kierunków SGP zastosowano nawet parametry fraktalne powierzchni. Najbardziej uzasadniony i precyzyjny pod względem matematycznego opisu wydaje się być sposób polegający na analizie powierzchniowej funkcji autokorelacji lub widmowej gęstości mocy [12, 64, 67, 167, 270, 272, 304]. Do analizy wykorzystuje się jedną z tych funkcji, ponieważ funkcja gęstości widmowej mocy jest przekształceniem Furiera powierzchniowej funkcji autokorelacji. Jest ona miarą zależności wartości danych w jednym położeniu od ich wartości w drugim położeniu. Estymację (ocenę) powierzchniowej funkcji autokorelacji określa się wg wzoru [227]:

$$R(\tau_i, \tau_j) = \frac{1}{(M-i)(N-j)} \sum_{l=1}^{N-j} \sum_{k=1}^{K-i} z(x_k, y_l) z(x_{k+i}, y_{l+j}) \tag{2.3}$$

gdzie:

M, N – obszary próbkowania,

$z(x_k, y_l)$ – powierzchnia resztkowa (szczątkowa),

$z(x_{k+i}, y_{l+j})$ – powierzchnia nośna,

x, y – kierunki próbkowania;

przy czym: $i = 0, 1,..., m < M$; $j = 0, 1,...., n < N$; $\tau_i = i\Delta x$, $\tau_j = j\Delta y$.

Powierzchniowa funkcja autokorelacji jest symetryczną funkcją rzeczywistą. Jej wartość przy zerowym przesunięciu jest wartością maksymalną, równą

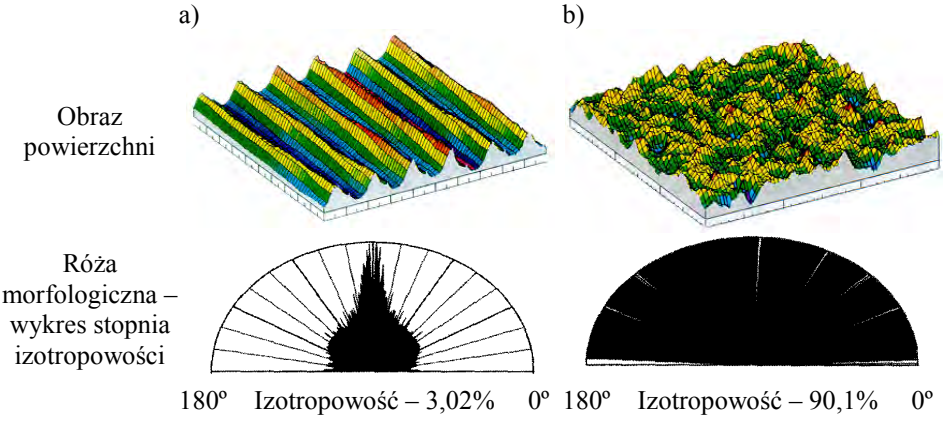
wariancji wysokości nierówności, czyli wartości parametru Sq. Unormowana wartość funkcji autokorelacji po podziale przez wariancję profilu zawiera się w granicach (-1, 1). W kierunku powierzchni, w którym dane są mniej skorelowane, funkcja autokorelacji ma większy gradient niż w innych kierunkach.

Funkcja gęstości widmowej mocy jest transformatą Fouriera funkcji autokorelacji i ilustruje, w jaki sposób odchyłka nieregularności powierzchni rozkłada się wraz z częstotliwością powierzchni. Cyfrowa postać funkcji gęstości widmowej mocy jest następująca [227]:

$$S(\tau_x, \tau_y) = \frac{1}{(M-i)(N-j)} \sum_{l=1}^{N-j} \sum_{k=1}^{K-i} \left[z(x_k, y_l) - z(x_{k+i}, y_{l+j}) \right]^2 \qquad (2.4)$$

W przypadku analizy powierzchni z zastosowaniem tej funkcji przyjmuje się, że rzeczywiste ślady obróbki są prostopadłe do ukierunkowania widmowej gęstości mocy.

Podczas analizy SGP opartej na funkcjach widmowych uzyskuje się m.in. tzw. różę morfologiczną, której kształt jest asymetryczny, smukły i wydłużony w jednym kierunku w przypadku powierzchni anizotropowych, natomiast okrągły i symetryczny dla powierzchni izotropowych [227]. Na rysunku 2.12 przedstawiono różę morfologiczną dla powierzchni z wyraźnym ukierunkowaniem śladów obróbki – powierzchni anizotropowej oraz dla struktury bez uprzywilejowanych kierunków śladów obróbki – powierzchni izotropowej.



Rys. 2.12. Róża morfologiczna dla struktury: a) anizotropowej, b) izotropowej [227]

W przypadku oceny SGP z zastosowaniem analiz widmowych można sformułować następujące wnioski [226, 227]:

- największe znaczenie w analizie widmowej mają składowe o małej częstotliwości, rola składowych o dużej częstotliwości jest znikoma,
- na powierzchniach okresowych w jednym lub dwóch kierunkach prostopadłych energia mocy koncentruje się w obszarze częstotliwości właściwej wzdłuż tych samych kierunków,

- na powierzchniach anizotropowych energia mocy koncentruje się wzdłuż kierunku prostopadłego do kierunkowości (symetryczności) struktury,
- w przypadku powierzchni anizotropowych mieszanych z udziałem składowej losowej o charakterze krótkofalowym decydujący udział zachowują składowe okresowe długofalowe, określające anizotropowość struktury,
- w powierzchniach anizotropowych losowych pojawiają się charakterystyczne cechy losowego szumu na tle wyraźnych dominujących składowych z małą częstotliwością, przy czym struktura powierzchni zachowuje anizotropowość i kierunkowość,
- w strukturach izotropowych losowych wyraźnie dominuje szum losowy, a cechy anizotropowości są znikome.

Stopień izotropowości (Iz) wyrażać można w procentach – od 0 do100% lub w zakresie wartości od 0 do 1. Czasami zamiast stopnia izotropowości przyjmuje się jego odwrotność, czyli stopień anizotropowości. W pracy [227] określano stopień izotropowości wyrażony w %, natomiast w publikacjach [67, 161] wyznaczano stopień anizotropowości zawierający się od 0 do 1. W pracy przedmiotowa izotropowość wyrażona będzie w procentach.

Wartości stopnia izotropowości bliskie zeru oznaczają strukturę całkowicie anizotropową, a bliskie jedności czy też 100% – strukturę całkowicie izotropową. Przez analogię określa się charakter struktury opisany stopniem anizotropowości. Umownie przyjmuje się następujący podział ukształtowania struktury w zależności od stopnia izotropowości [227]:

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

W szerokim zakresie struktura ma charakter mieszany, wynika z tego istotność właściwej oceny ukształtowania struktury w kontekście kryteriów tribologicznych. Struktury mieszane mogą charakteryzować się bardzo odmiennymi cechami użytkowymi.

Uzupełnieniem cech stereometrycznych, które determinują stan warstwy wierzchniej, są – jak już sygnalizowano – wielkości fizykochemiczne, tj. rodzaj materiału i jego budowa, naprężenia własne i twardość.

Rodzaj tworzywa konstrukcyjnego wynika z jego składu chemicznego, natomiast jego budowa (struktura metalograficzna) charakteryzowana jest rozmieszczeniem elementów składowych struktury (kryształów, ziarn, uporządkowanie atomów w sieci krystalicznej) oraz zbiorem relacji między tymi elementami [39, 85].

Metale i większość niemetali mają strukturę krystaliczną, czyli budowę wewnętrzną złożoną z kryształów, o ściśle określonym rozmieszczeniu atomów,

jonów lub cząsteczek w komórkach elementarnych kryształu. W takim ujęciu warstwa wierzchnia może mieć mikrostrukturę:

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

Mikrostruktura pierwotna w warstwie wierzchniej występuje rzadko, np. przy przetopieniu (laserowym, elektronowym, plazmowym), natomiast mikrostruktura wtórna występuje prawie zawsze, z tym, że przemiany mikrostruktury mogą zachodzić wielokrotnie: w trakcie procesu wytwarzania bądź w trakcie eksploatacji.

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

W wyniku działania obciążeń zewnętrznych położenie atomów sieci krystalicznej materiału wykracza poza poziom minimum energii, zakłócając budowę sieci, a tym samym powodując stan naprężeń własnych materiału. Po zaprzestaniu oddziaływań zewnętrznych zanika pierwsza część zmian w postaci zmian odwracalnych (odkształceń sprężystych) i wywołanych nimi naprężeń, natomiast pozostaje w materiale druga część w postaci zmian nieodwracalnych (np. odkształceń plastycznych) i wynikających stąd naprężeń, które od tego momentu stanowią naprężenia własne materiału [97, 300].

Naprężenia własne można sklasyfikować według następujących czynników [39, 85]:

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

Naprężenia własne sumują się z naprężeniami pochodzącymi od obciążeń zewnętrznych, dlatego też ze względu na wytrzymałość i trwałość elementu korzystne jest, aby w warstwie wierzchniej występowały naprężenia ściskające (ze znakiem ujemnym).

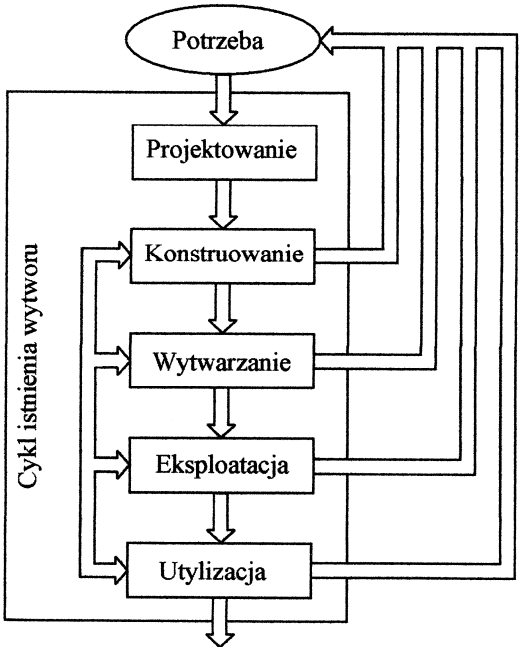
Kolejną cechą fizykochemiczną, która wpływa na stan WW, jest twardość czy też jej odwrotność – kruchość. Jest to cecha umowna, polega na stawianiu oporu odkształceniom plastycznym lub pęknięciom przy lokalnym, silnym oddziaływaniu na jego powierzchnię innego twardszego ciała. Umożliwia ona po-

równywanie odporności różnych materiałów na uszkodzenia powierzchni. Przeważnie, twardość WW powinna być tym większa, im większe naciski ma ona przenosić. Z uwagi na to, że jest ona skorelowana z kruchością, przy zakładaniu określonej twardości elementów maszyn należy uwzględnić również kruchość materiału.

2.2. WARSTWA WIERZCHNIA ELEMENTÓW MASZYN W POSZCZEGÓLNYCH FAZACH CYKLU ICH ISTNIENIA

Istnienie i funkcjonowanie każdego obiektu technicznego można rozpatrywać jako ciąg następujących po sobie faz. Występujące w takim cyklu fazy są różnie nazywane, a działania w nich podejmowane są zależne od dziedziny, w której obiekt jest analizowany – inne są np. w marketingu, inne w zarządzaniu, jeszcze inne w dziedzinie techniki. W obrębie techniki przyjęto, że w cyklu istnienia wytworu (zwanego także cyklem życia) występuje pięć faz – rysunek 2.13:

- projektowania,
- konstruowania,
- wytwarzania,
- eksploatacji,
- utylizacji.



Rys. 2.13. Fazy cyklu istnienia wytworu i relacje między nimi

Poszczególne fazy następują kolejno po sobie i w każdej następnej wykorzystywane są działania zrealizowane w fazie poprzedniej. Pomiędzy nimi występują interakcje, które powodują, że w każdej z nich istnieją możliwości weryfikacji i ewentualnego korygowania działań z faz poprzednich.

Analizując fazy istnienia maszyny, stwierdzić można, że we wszystkich z nich warstwa wierzchnia współpracujących elementów par kinematycznych tworzących strukturę maszyny ulega zmianom – następuje zatem transformacja WW.

W fazach projektowania i konstruowania są to zmiany wirtualne, zachodzące potencjalnie w wyniku podejmowanych decyzji konstrukcyjnych, które stanowią podstawę do działań w kolejnych fazach i determinują ich przebieg. W fazie utylizacji także zachodzą zmiany w WW, lecz nie mają one już wpływu na funkcjonowanie obiektu technicznego. W tym aspekcie ze względu na mechanizm i nabywane cechy wyróżnić można dwie formy transformacji, występujące odpowiednio w fazach:

- wytwarzania – WW istniejącą w tej fazie przyjęto nazywać technologiczną warstwą wierzchnią (TWW),
- eksploatowania – istniejącą wówczas WW nazywa się eksploatacyjną warstwą wierzchnią (EWW).

Wszelkie operacje i zabiegi technologiczne realizowane w odniesieniu do TWW mają na celu nadanie jej coraz lepszych cech: większej twardości, mniejszej chropowatości, odpowiednich do realizowanych zadań naprężeń.

Druga forma – eksploatacyjna WW – na skutek oddziaływania wymuszeń eksploatacyjnych ulega ciągłej destrukcji, przy czym intensywność tego procesu jest zmienna w czasie.

Ze względu na wskazane różnice proponuje się rozpatrywać transformację tych warstw jako dwa oddzielne, lecz zależne od siebie zjawiska.

W literaturze nie ma jednoznacznych informacji, jak należy zakwalifikować WW elementów w fazie magazynowania i transportu: do TWW czy EWW. Z jednej strony proces wytwórczy został już zakończony – nie jest więc to już technologiczna WW, z drugiej zaś – nie oddziałują na nią jeszcze zewnętrzne wymuszenia eksploatacyjne, nie ma więc podstaw do zaliczenia jej do eksploatacyjnej WW.

Z uwagi na to, że ewentualne czynniki fazy magazynowania i transportu międzyoperacyjnego oddziałują na TWW, to również przez analogię w pracy przyjęto, że magazynowanie po procesie technologicznym i transport zewnętrzny zaliczają się do fazy produkcji. W takim ujęciu ewentualne oddziaływanie czynników otoczenia środowiska, w którym znajduje się WW elementów maszyn, również zaliczono do transformacji TWW.

Należy zaznaczyć, że pojęcia technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej intuicyjnie istnieją w technikach wytwarzania w zasadzie od chwili pojawienia się tribologii jako integralnej dziedziny nauki zajmującej się zagadnieniami tarcia, zużywania i smarowania.

2.2.1. Transformacja technologicznej warstwy wierzchniej

Technologiczna warstwa wierzchnia, jak już wcześniej zaznaczono, pojmowana jest jako warstwa konstytuowana w wyniku celowych działań realizowanych podczas procesów technologicznych. Określa więc stan elementu podczas jego wytwarzania aż do zakończenia tego procesu. Po raz pierwszy do określenia tego stanu użyto nazwy „technologiczna warstwa wierzchnia" w roku 1995 w pracy [39]. Od tego czasu jest ona powszechnie stosowana nie tylko w dziedzinie tribologii. Określenie technologicznej WW dotyczy ukształtowanej w procesie wytwarzania warstwy wierzchniej wraz z jej cechami charakterystycznymi. Jej własności i właściwości zależą przede wszystkim od zastosowanej technologii. Zależą one również od użytego tworzywa konstrukcyjnego. Ze względu na duże zróżnicowanie oczekiwanych cech oraz związaną z tym ogromną liczbą stosowanych w przemyśle procesów technologicznych oraz ich odmian TWW jest obiektem zainteresowania bardzo wielu naukowców, czego efektem są liczne publikacje związane bezpośrednio i pośrednio z tą tematyką.

W przypadku tworzenia nowej warstwy wierzchniej w procesie wytwarzania w ubytkowych technologiach występuje zwykle całkowite lub częściowe usuwanie wcześniej wytworzonej warstwy. Nowa warstwa uzyskuje swe specyficzne cechy w wyniku zmian cech już wytworzonej powierzchni. Uzyskanie tych cech dokonuje się przez poddanie tworzywa konstrukcyjnego operacjom technologicznym, które mogą służyć wyłącznie do nadania warstwie wierzchniej cech zwiększających jej cechy potencjalne i użytkowe lub przez nadanie cech ubocznie, gdy operacja technologiczna jest ukierunkowana, np. tylko na uzyskanie określonego kształtu. Zawsze jednak tworzenie nowej warstwy wierzchniej (nowej powierzchni fizycznej) wymaga dostarczenia pewnej ilości energii (z określoną gęstością mocy), różnej pod względem rodzaju i wartości w zależności od operacji technologicznej.

Analizując tworzenie warstwy wierzchniej w aspekcie dostarczanej energii, można wyróżnić energię tworzenia oraz energię niszczenia [37, 38]. O energii tworzenia mowa jest wówczas, gdy dostarczona energia służy do tworzenia nowej, w stosunku do już istniejącej warstwy wierzchniej, np. powstawanie WW przez szlifowanie po obróbce cieplnej. Energia niszczenia występuje wówczas, gdy następuje nieużyteczne niszczenie już istniejącej warstwy, np. w wyniku korozji, lub użyteczne niszczenie efektów poprzedniej operacji lub zabiegu technologicznego, np. szlifowanie po toczeniu – w wyniku czego powstaje WW o bardziej pożądanych cechach. O energii niszczenia mowa jest również w trakcie eksploatacji, gdy dostarczana energia niszczy WW, niekorzystnie zmieniając jej cechy.

Jak wspomniano wcześniej, cechy technologicznej warstwy wierzchniej zależą przede wszystkim od zastosowanej technologii wytwarzania.

Metod konstytuowania TWW jest bardzo wiele, podobnie jak liczne są zabiegi i operacje technologiczne – składowe procesów technologicznych elementów maszyn. Bardzo ogólny podział metod tworzenia na nich WW, w którym

kryterium podziału stanowi przyrost materiału, zaproponowano w pracy [299]. Według tej klasyfikacji wyróżnia się następujące metody konstytuowania WW:

- ubytkowe – realizowane przez zmniejszanie wymiarów przedmiotu, np. obróbka skrawaniem, erozyjna, strumieniowa,
- bezubytkowe – realizowane bez istotnego zmniejszenia wymiarów przedmiotu, np. obróbka cieplna, plastyczna, implantowanie, PVD,
- przyrostowe – realizowane przez zwiększenie wymiarów przedmiotu, np. nanoszenie powłok elektrolitycznych.

Przykłady obróbek wymienione w każdej z przytoczonych grup świadczą, że przyrost traktowany jest szeroko, tzn. może być dodatni, ujemny lub zerowy. Dodatkowo może on być masowy lub geometryczny. Przy takim ujęciu podziału z użyciem omawianego kryterium wszystkie znane techniki stosowane w procesach wytwórczych można zakwalifikować przynajmniej do jednej z przytoczonych grup. Zauważyć należy, że nie zawsze przyrostowi masy towarzyszyć musi zmiana wymiaru liniowego i odwrotnie. Jako reprezentatywne w tym względzie przykłady można przytoczyć [39]:

- implantowanie – przyrost masy bez zmiany wymiaru geometrycznego,
- nagniatanie – zmiana wymiaru geometrycznego bez zmiany masy.

W zależności od rodzaju oddziaływania fizycznego, chemicznego lub fizykochemicznego na rdzeń WW lub jej powierzchnie wszystkie metody wytwarzania technologicznych warstw wierzchnich można zakwalifikować do jednej z poniższych grup [34, 143]:

- mechaniczne (np. skrawanie – nacisk narzędzia, energia kinetyczna narzędzia lub cząstek stałych w celu umocnienia na zimno WW),
- cieplne (oddziaływanie ciepła dostarczonego w różnej postaci),
- cieplno-mechaniczne (połączone oddziaływanie cieplne i siłowe),
- chemiczne i elektrochemiczne (redukcja chemiczna lub elektrochemiczna, reakcja chemiczna, metody CVD),
- cieplno-chemiczne (połączone oddziaływanie ciepła i ośrodka chemicznie aktywnego,
- fizyczne (np. zestalenie fizyczne, osadzanie fizyczne par metali lub jonów metali i niemetali – metody PVD).

Każda z tych grup umożliwia uzyskanie WW o określonej grubości, przeznaczeniu i cechach. W grupach tych występuje wiele rodzajów technologii i operacji technologicznych.

Najczęściej TWW uzyskuje się jedną metodą lub sposobem, chociaż obecnie obserwuje się szybki postęp w stosowaniu obróbek hybrydowych (kombinacja tradycyjnych). W obróbkach takich uzyskuje się intensyfikację zasadniczego procesu obróbki przy jednoczesnym minimalizowaniu ich negatywnych stron [13, 84, 203, 210, 236].

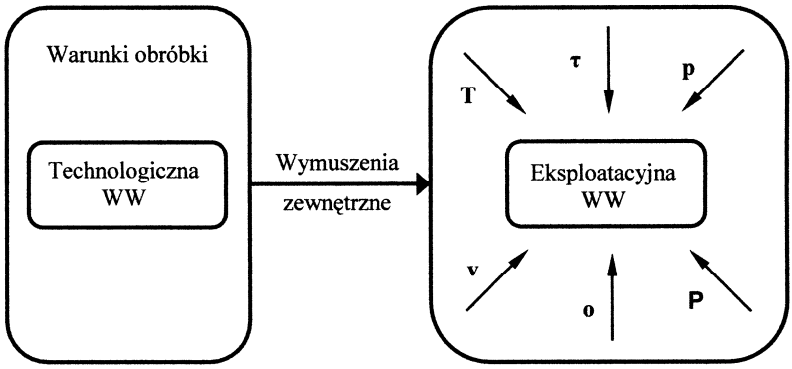
2.2.2. Transformacja eksploatacyjnej warstwy wierzchniej

Z chwilą rozpoczęcia procesu eksploatowania obiektu technicznego, a więc od czasu, gdy na niego i jego elementy składowe zaczynają oddziaływać eksploatacyjne wymuszenia zewnętrzne, TWW przekształca się skokowo w EWW i rozpoczyna się proces jej transformacji.

Stan EWW zmienia się podczas całej fazy użytkowania maszyn i urządzeń. Cechą wspólną transformacji TWW i EWW jest więc dynamika tego zjawiska. Jednakże w przypadku TWW ze względu na przebieg eksploatacji istotny jest stan na końcu etapu wytwarzania, natomiast dla EWW istotny jest jej bieżący stan.

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

Czynniki towarzyszące tworzeniu się eksploatacyjnej warstwy wierzchniej oraz wywołujące w niej zmiany przedstawiono schematycznie na rysunku 2.14.



Rys. 2.14. Czynniki niezbędne do przekształcania się TWW w EWW: T – temperatura, τ – czas, p – naciski (ciśnienie), v – prędkość, o – rodzaj ośrodka, P – promieniowanie

Stan wyjściowy pary kinematycznej obiektu technicznego w postaci technologicznej warstwy wierzchniej elementów tworzących tę parę jest zadany materiałowo, konstrukcyjnie i technologicznie. Pod wpływem oddziaływania wymuszeń zewnętrznych ulega on ciągłym zmianom w czasie.

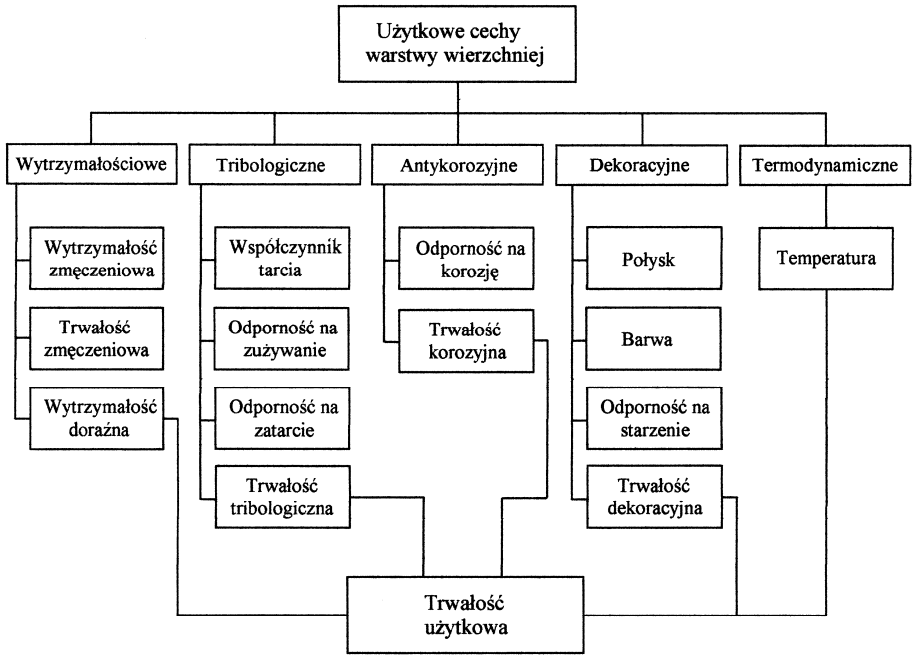
Transformowaną eksploatacyjną warstwę wierzchnią cechuje zdolność zmniejszania skutków oddziaływania wymuszeń zewnętrznych. W tribologii zewnętrznym przejawem takiego procesu są ewolucyjne zmiany chropowatości współpracujących powierzchni i odpowiednie do nich zmiany współczynnika tarcia i intensywności zużywania [37].

Wymuszenia zewnętrzne zależą od charakteru współpracy rozpatrywanego układu z innym układem (otaczającym środowiskiem) i mogą być:

- naturalne – występujące bez udziału człowieka, np. oddziaływanie chemiczne otaczającego ośrodka (środowiska),
- sztuczne – występujące w rezultacie ingerencji człowieka, np. oddziaływanie sił, środków smarowych w procesie tarcia.

Cechy użytkowe eksploatacyjnej warstwy wierzchniej elementów pary kinematycznej są wynikiem wcześniej ukształtowanych cech TWW, odpowiednich do przeciwstawienia się przewidywanym wymuszeniom lub ingerencji czynnej (poprzez stosowanie odpowiednich eksploatacyjnych wymuszeń zewnętrznych) bądź ingerencji biernej (np. ograniczaniu dostępu mediów chemicznych o zmiennej aktywności) [37, 38, 292]. Wymuszenia powodują ewolucyjne zmiany właściwości użytkowych EWW jako odpowiedź układu na zadane wymuszenie w wyniku samoorganizacji materii. W czasie eksploatacji właściwości użytkowe zmieniają się w stosunku do właściwości potencjalnych i są funkcją oddziaływania otoczenia w czasie. W czasie użytkowania ich wartości nie są przeważnie znane, można je mierzyć w przerwach użytkowania, po określonym czasie od rozpoczęcia użytkowania lub po stwierdzeniu, że osiągnęły pewną wartość, w określonych przerwach remontowych lub po zakończeniu okresu użytkowania.

Wymuszeniami najczęściej występującymi podczas transformacji eksploatacyjnej warstwy wierzchniej są: obciążenia mechaniczne (zmienne bądź stałe), tarcie (suche bądź w obecności smaru), oddziaływanie ośrodka eksploatacyjnego (utleniającego, redukującego) lub ich kombinacja. Do poszczególnych obszarów oddziaływania narażeń zewnętrznych na EWW można przypisać ogólne właściwości użytkowe: wytrzymałościowe (głównie zmęczeniowe), tribologiczne, antykorozyjne, termodynamiczne, czasami istotne mogą być również właściwości dekoracyjne. Na rysunku 2.15 przedstawiono podstawowe cechy użytkowe EWW odpowiadające (oprócz właściwości dekoracyjnych) określonym grupom wymuszeń zewnętrznych podczas transformacji [35, 39, 95, 97, 119].



Rys. 2.15. Najistotniejsze cechy użytkowe warstwy wierzchniej

Ze względu na funkcjonalność węzła tarcia należy dążyć do tego, aby właściwości użytkowe były jak najdłużej tożsame z cechami potencjalnymi warstwy wierzchniej lub do nich zbliżone. Zapewnia to wówczas pracę pary kinematycznej, a pośrednio – całego obiektu technicznego z niezmienionymi, konstrukcyjnie założonymi cechami.

Miarą odporności na transformację EWW – pod wpływem wymuszeń – jest trwałość odpowiednio do tych wymuszeń: wytrzymałościowa, tribologiczna, korozyjna, dekoracyjna.

W przypadku oddziaływania różnych czynników zewnętrznych na układ użytkowym miernikiem jakości materiałowo-eksploatacyjnej jest trwałość użytkowa, czyli czas przebywania układu w ustalonym zbiorze stanów zdatności (sprawności). Innymi słowy jest to okres, w którym układ zachowuje swoje właściwości użytkowe w warunkach eksploatacji. W sytuacji wystąpienia kombinacji wymuszeń trwałość użytkowa jest zwykle określana dla wymuszenia dominującego, ale przy uwzględnieniu pozostałych.

Trwałość, zwłaszcza użytkowa, jest podstawową właściwością eksploatacyjną każdego układu i świadczy o jego jakości użytkowej.

2.2.3. Relacje między transformacją technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej

Technologiczną warstwę wierzchnią charakteryzują właściwości potencjalne, czyli takie, które określają możliwości techniczne warstwy w stanie gotowości do pracy (współpracy). W czasie magazynowania lub transportu maszyn ich elementy czasami pokrywa się środkami ochrony czasowej, aby zachować nabyte potencjalne cechy TWW. Taką ochronę usuwa się zazwyczaj przed rozpoczęciem eksploatacji.

Eksploatacyjną warstwę wierzchnią charakteryzują własności i właściwości użytkowe, tworzące zbiór cech eksploatacyjnych całej maszyny. Na początku eksploatacji właściwości te są zdeterminowane cechami potencjalnymi TWW.

Stwierdzono już wyżej, że stan warstwy wierzchniej w poszczególnych fazach istnienia wytworu nie jest stały, ale ulega ciągłym zmianom. Cechy TWW zmieniają się wraz z realizacją kolejnych operacji czy też zabiegów technologicznych. O cechach użytkowych elementów par kinematycznych decyduje jednak stan WW tych elementów po zakończeniu ostatniej operacji procesu produkcyjnego, dlatego też właśnie ten stan należy przyjąć jako TWW_{wy} gotowego elementu. W takim ujęciu i tylko w takim ma ona charakter statyczny (cechy potencjalne). Przejściowe wartości parametrów opisujących stan WW podczas realizacji procesów wytwórczych mają znaczenie w analizach tribologicznych jedynie wówczas, gdy wywołują reakcje w kolejnych operacjach technologicznych. W fazie magazynowania i transportu mogą ewentualnie oddziaływać na WW czynniki otoczenia środowiska, w którym się ona znajduje. Jednak to oddziaływanie na WW nie jest znaczące, dlatego tej fazy stanu WW nie wyodrębniono w transformacji WW, a tylko zaliczono do TWW.

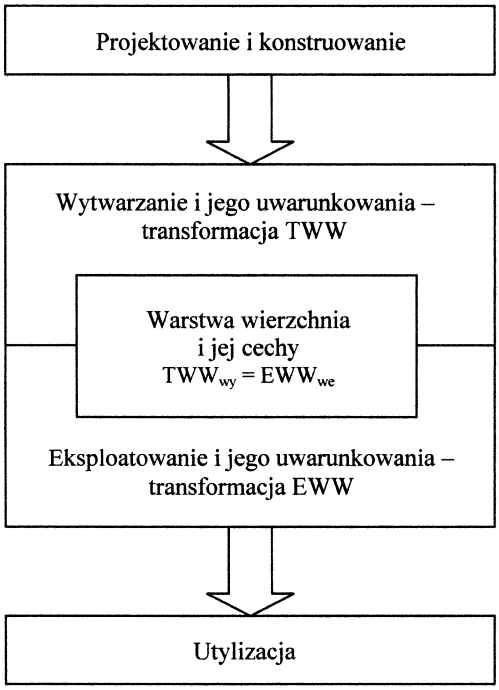
Cechy EWW zmieniają się podczas całej fazy użytkowania maszyn i urządzeń od stanu równoważnego stanom TWW_{wy}, który jest jednocześnie stanem początkowym eksploatacyjnej WW i który można oznaczyć jako EWW_{we}, do stanu, w którym cechy WW wskazują na konieczność zakończenia fazy eksploatacji obiektu i jego naprawę lub utylizację. W tej fazie istnienia wytworu istotny jest bieżący stan EWW.

Cechą wspólną transformacji TWW i EWW jest dynamika tego zjawiska. Cechy TWW ulegają zmianom pod wpływem wymuszeń technologicznych, a cechy EWW – pod wpływem wymuszeń eksploatacyjnych. Wymuszenia te mogą mieć charakter zdeterminowany, są wówczas w sposób zamierzony i celowy sterowane, lub losowy – wówczas wpływ ten jest trudny do zdefiniowania. Należy zauważyć, że podczas transformacji TWW przeważający udział mają wymuszenia o charakterze zdeterminowanym – odwrotnie niż podczas transformacji EWW.

Z przeprowadzonych analiz wynika jednoznacznie, że ze względu na proces zużywania stan TWW_{wy} jest bardzo istotny. To on wyznacza cechy EWW_{we}, z którymi rozpocznie się proces transformacji eksploatacyjnej WW, a więc jak będzie przebiegać (szczególnie na początku współpracy) proces zużywania

(mechanizm, intensywność) wyznaczony przez chwilowy stan EWW. Zatem stan TWW_{wy} determinuje w dużej mierze cechy użytkowe i charakter procesu zużywania danej pary kinematycznej [176].

Na rysunku 2.16 przedstawiono relacje między transformacją TWW a EWW podczas cyklu istnienia wytworu.



Rys. 2.16. Transformacja WW w fazach wytwarzania i eksploatowania cyklu istnienia wytworu

W przypadku transformacji EWW dodatkowym istotnym czynnikiem wpływającym na zmianę cech WW, obok wartości wymuszeń eksploatacyjnych, jest czas oddziaływania tych wymuszeń. W każdym czasie eksploatacji stan fizyczny i chemiczny warstw wierzchnich ulega zmianie właśnie wskutek wymuszeń zewnętrznych i czasu ich oddziaływania.

W przypadku transformacji TWW czas oddziaływania wymuszeń technologicznych nie ma bezpośredniego wpływu na uzyskiwane cechy WW, a jedynie na ilościowe możliwości wytworzenia warstw wierzchnich.

W ujęciu energetycznym, transformację warstwy wierzchniej można scharakteryzować za pomocą zasad termodynamiki. W uogólnieniu można stwierdzić, że warstwa wierzchnia stanowi układ heterofazowy różniący się własnościami od rdzenia, a zachodzące w niej przemiany energetyczne związane są ze zmianami parametrów stanu. Pod względem energetycznym WW można scha-

rakteryzować uogólnionym równaniem zgodnym z I i II zasadą termodynamiki [37, 263, 265]:

$$dG = dH - TdS = dU + Vdp - TdS = -SdT + Vdp + \sigma ds + \Sigma \mu_i dn_i + \varphi dq \quad (2.5)$$

gdzie:

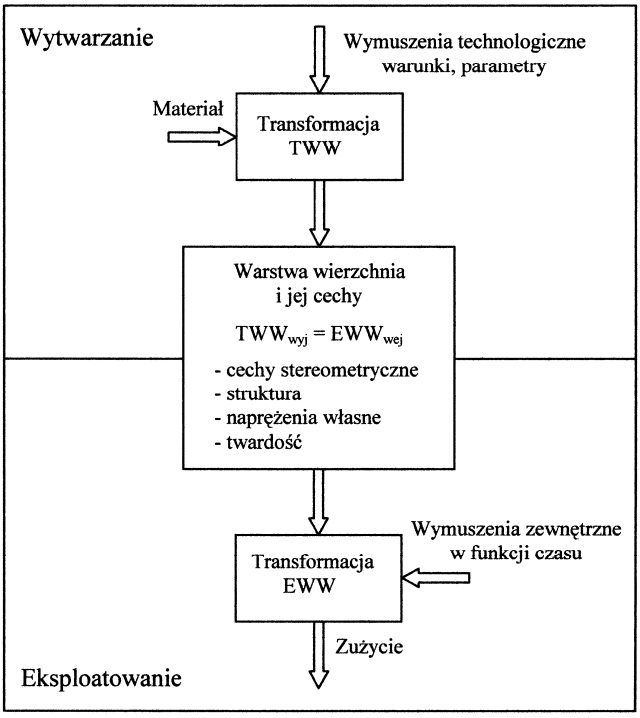
- dG – miana entalpii swobodnej (energii Gibssa), czyli części energii wewnętrznej układu, którą w warunkach izotermiczno-izobarycznych można przemienić w pracę,
- dH – zmiana entalpii, (H – entalpia układu),
- TdS – zmiana energii swobodnej, T – temperatura bezwzględna, S – entropia,
- dU – zmiana energii wewnętrznej,
- SdT – zmiana (ubytek) energii cieplnej,
- Vdp – zmiana energii mechanicznej, V – objętość, p – ciśnienie,
- σds – zmiana energii powierzchniowej, σ – napięcie powierzchniowe, s – powierzchnia,
- $\Sigma \mu_i dn_i$ – zmiana energii chemicznej, μ – potencjał chemiczny, n – liczba moli,
- φdq – zmiana energii elektrycznej, φ – potencjał elektryczny, q – ładunek elektryczny.

Warstwa wierzchnia pozostaje w równowadze, gdy suma wartości poszczególnych składników równania jest niezmienna. Wymuszenie zewnętrzne (technologiczne lub eksploatacyjne) wywołuje zmianę wartości odpowiedniego członu równania, co z kolei powoduje zmiany pozostałych składników równania, czyli zmiany właściwości układu. Im większa wartość wymuszenia, tym większa zmiana jednej lub kilku właściwości układu, przy czym zmiana ta może być synergiczna lub antagonistyczna [37]. Każde wymuszenie to także doprowadzenie do WW pewnej ilości energii w dowolnej postaci. Od ilości doprowadzonej energii, a dokładniej od ilości energii doprowadzonej w jednostce czasu do jednostkowej powierzchni, czyli od gęstości mocy, zależy intensywność wymuszenia.

Jak już wspomniano, w przypadku gdy na układ zostanie wywarte jakiekolwiek oddziaływanie zewnętrzne, zmieniające wartość jednej z postaci energii w równaniu (2.5), wtedy wymuszone są odpowiednie zmiany wartości pozostałych jego postaci. Zmiany te zależą od lokalnych warunków, w wyniku których zachodzą odpowiednie przemiany energii w określonej kolejności [157]. Różne oddziaływanie mechaniczne (np. nagniatanie – następuje zgniot) na ukształtowaną WW może zniekształcić (np. rozdrobnić) jej strukturę, co może spowodować zmianę jej reaktywności chemicznej, a w konsekwencji – wystąpienie zjawisk cieplnych, elektrycznych lub innych. Podobnie w wyniku oddziaływania cieplnego mogą nastąpić zmiany np. struktury pierwotnej, potencjału chemicznego, napięcia powierzchniowego, rezystywności, objętości właściwej, naprężeń własnych itd.

2.3. CZYNNIKI DETERMINUJĄCE PRZEBIEG TRANSFORMACJI

Zmiany cech WW podczas jej transformacji pod wpływem czynników zewnętrznych mogą być zdeterminowane (programowalne) lub losowe. Mogą być pożądane dla zachodzących zmian w WW bądź też działać destrukcyjnie na cechy użytkowe elementów maszyn. Czynniki te i ich oddziaływanie na warstwę wierzchnią są uwarunkowane stosowaną technologią na etapie wytwarzania oraz warunkami eksploatacji w fazie eksploatowania (rys. 2.17).



Rys. 2.17. Etapy transformacji warstwy wierzchniej i czynniki ją determinujące

Analizę czynnikową transformacji z powodów wymienionych w poprzedniej części pracy także przeprowadzono rozdzielnie dla TWW i EWW.

2.3.1. Czynniki wpływające na cechy technologicznej warstwy wierzchniej

W przypadku technologicznej WW zmiany w niej zachodzące wynikają z kolejności operacji i zabiegów technologicznych. Transformacja TWW jest zatem skutkiem realizowanych procesów obróbkowych, przy czym dominujący wpływ ma ostatnia operacja. W takim ujęciu poniżej przedstawiono analizę czynników, które kształtują WW, bez względu na to, czy jest to operacja końcowa czy przejściowa.

W zagadnieniach budowy i eksploatacji maszyn dominującymi powierzchniami, które oddziałują na siebie, spełniając swoje funkcje, są powierzchnie obrobione. Uzyskuje się je w następstwie oddziaływania na nie energią zewnętrzną, która powoduje zmiany m.in. ich struktur geometrycznych. Energia może być dostarczana w postaci:

- mechanicznej – następuje wówczas obróbka ostrzem twardszym niż materiał obrabiany,
- chemicznej – np. trawienie środkami chemicznie aktywnymi,
- cieplnej – np. obróbka plazmą czy też wiązką promieniowania laserowego.

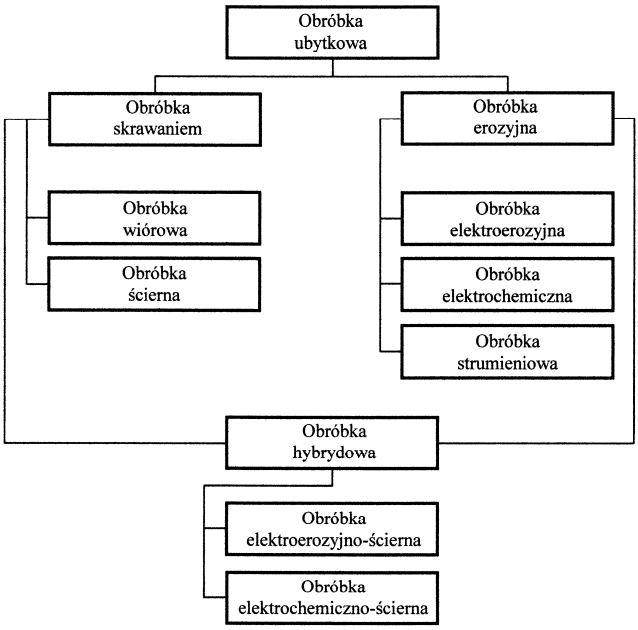
Energia procesu kształtowania może mieć również charakter hybrydowy, np. obróbka elektroerozyjno-ścierna czy też mechaniczna na gorąco.

Kształtowana w taki sposób struktura powierzchni zależy od kształtu narzędzia – ostrza narzędzia, wiązki energii oraz kinematyki ruchów względnych przedmiotu obrabianego i narzędzia. Uważa się, że struktura geometryczna powierzchni obrobionych jest „odciskiem palców" procesu technologicznego. Na podstawie profilu powierzchni oraz funkcji autokorelacji lub widmowej gęstości mocy można otrzymać informację o parametrach procesu, kształcie narzędzia, zużyciu narzędzia, wymiarach ziarna, stanie obrabiarki itp. [116, 131, 195, 198, 201, 202, 258, 260, 323, 343, 344].

Ogólny podział obróbek ubytkowych ze względu na sposób usuwania materiału przedstawiono na rysunku 2.18. Obserwowany postęp, zwłaszcza w zakresie obróbek erozyjnych, powoduje, że przedstawiony na rysunku zbiór metod ciągle się powiększa.

Dzięki dużej uniwersalności i dokładności kształtowania wśród obróbek ubytkowych najbardziej rozpowszechnione jest skrawanie oparte na modelu usuwania warstw materiału w postaci wiórów przez ostrze skrawające narzędzia. Łączny udział obróbki skrawaniem w przemyśle maszynowym jest oceniany obecnie na ok. 50% i według prognoz Międzynarodowego Stowarzyszenia Badań Procesów Wytwórczych (CIRP) udział ten, chociaż malejący – jeszcze długo będzie znaczny [92]. Wynika to ze zwiększających się możliwości stosowania skrawania i uzyskiwanych dużych dokładności.

Transformacja TWW pod wpływem wymuszeń technologicznych dotyczy zmian zarówno wnętrza WW, jak i jej powierzchni. Zmiany w WW wynikają z wymuszeń termicznych, siłowych i kinematycznych, które występują w procesie obróbki. Pod wpływem ciepła następują zmiany w strukturze WW. Liczne badania, np. [135, 291, 358], wykazały, że jednorodna, rozdrobniona struktura ma najlepsze własności wytrzymałościowe. W procesie technologicznym należy więc do takiej struktury dążyć, np. planując w nim obróbkę cieplną, należy jednak pamiętać, że w jej wyniku w WW powstaje pewien stan naprężeń.

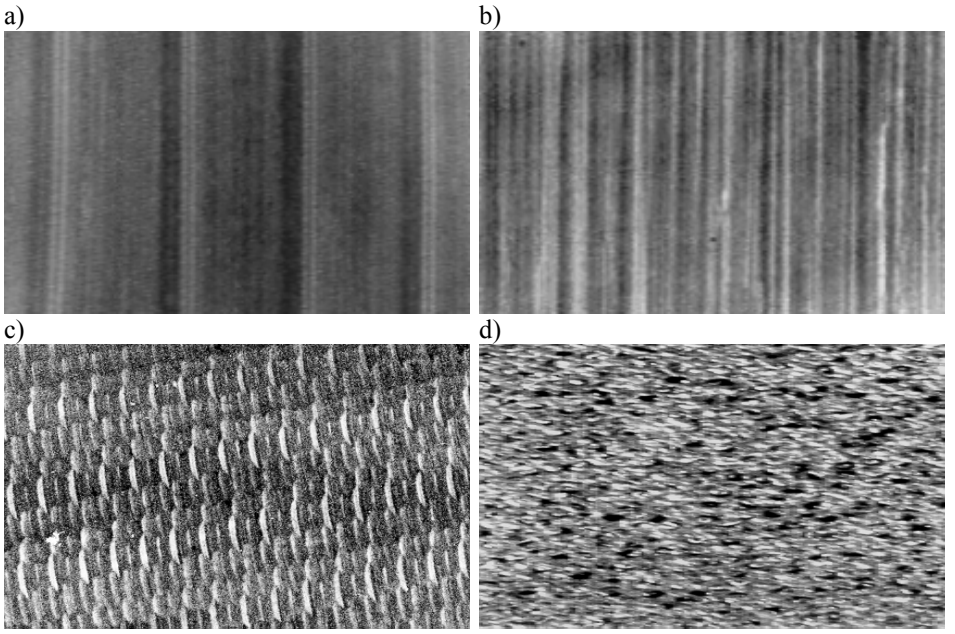


Rys. 2.18. Metody obróbki ubytkowej

Wymuszenia siłowe również powodują powstawanie w WW naprężeń. W zależności od sposobu obróbki i jej parametrów mogą to być naprężenia rozciągające lub ściskające. Ze względów na wytrzymałość stykową korzystne jest, aby w WW istniały naprężenia ściskające [29, 39, 85, 311, 316, 345], dlatego też proces technologiczny należy tak zaplanować, aby w wyniku ostatniej operacji pozostał w niej taki stan naprężeń.

Efekt oddziaływania wymuszeń kinematycznych widoczny jest głównie w SGP. Na rezultaty tych wymuszeń wpływają sposób oraz parametry obróbki. Od wartości parametrów oraz relacji między ruchami narzędzia i przedmiotu obrabianego zależy m.in. kształt i rozmieszczenie śladów obróbki po każdej operacji technologicznej, a więc kierunkowość SGP.

Porównując struktury przedstawione na rysunku 2.19 można zauważyć, jak różne mogą one być ze względu na zastosowany sposób obróbki wykończeniowej. W zależności od rozmieszczenia charakterystycznych śladów obróbki struktura powierzchni może być w pełni anizotropowa – rysunek 2.19a i b, częściowo anizotropowy – rysunek 2.19c bądź izotropowa – rysunek 2.19d.



Rys. 2.19. Struktury powierzchni po różnych obróbkach wykończeniowych: a) toczeniem, b) szlifowaniem, c) frezo-toczeniem, d) obróbką elektroerozyjną

Struktury uzyskane toczeniem i szlifowaniem mają widocznie zaznaczoną składową zdeterminowaną (kierunkowość śladów obróbki), która wynika z odwzorowania geometrii ostrza narzędzia i kinematyki obróbki. Powierzchnia uzyskana elektroerozyjnie ma strukturę typu losowego, a tym samym wykazuje dużą izotropowość. Struktura uzyskana metodą hybrydową (frezo-toczeniem) ma również zaznaczoną składową zdeterminowaną, ale ślady obróbki częściowo wykazują izotropowość, a częściowo anizotropowość.

Podobny wpływ na rozmieszczenie i kształt śladów obróbki ma zmiana podstawowych parametrów technologicznych.

Kształtowanie struktury geometrycznej powierzchni w procesach obróbkowych, zwłaszcza w zakresie jej kierunkowości, zależy od kształtu narzędzia oraz kinematyki ruchów względnych przedmiotu obrabianego i narzędzia.

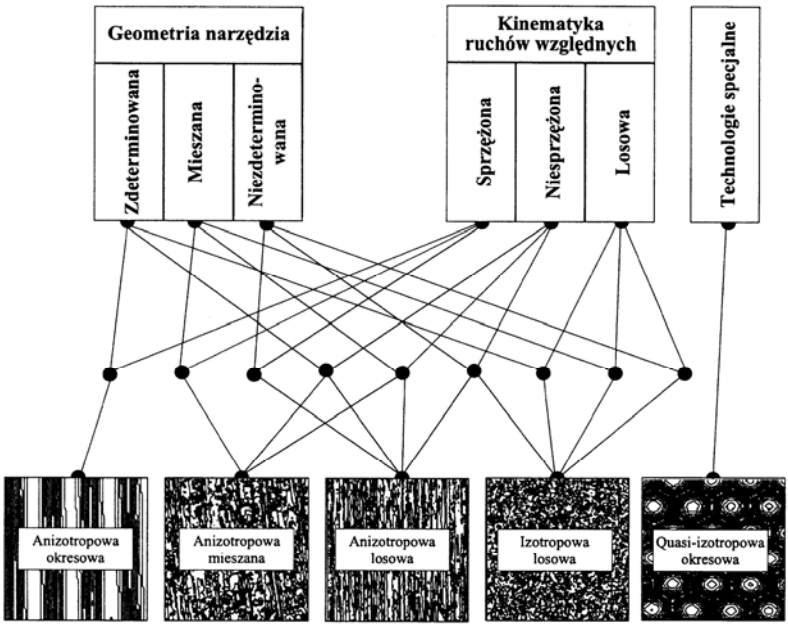
Geometria narzędzia może być: zdeterminowana, niezdeterminowana lub losowa. Geometrią zdeterminowaną charakteryzują się wszystkie narzędzia z określoną geometrią ostrza (np. noże tokarskie, frezy, wiertła) lub powierzchni kształtującej (np. nagniataki diamentowe, kulki do kulowania). Przykładem geometrii niezdeterminowanej jest większość fizycznych procesów obróbkowych (np. z użyciem strumienia plazmy czy łuku elektrycznego). Geometria losowa jest cechą charakterystyczną wszystkich narzędzi ściernych zarówno ze spojonym, jak i luźnym ścierniwem.

Kinematyka ruchów względnych narzędzia i przedmiotu obrabianego może być: sprzężona, niesprzężona lub losowa. W przypadku kinematyki sprzężonej

wzajemne przemieszczenia narzędzia i przedmiotu obrabianego są sztywno związane ze sobą łańcuchem kinematycznym (np. w procesie toczenia). Przykładem kinematyki niesprzężonej są wszystkie procesy szlifowania, ponieważ wówczas układy napędów ruchu głównego i posuwowego są rozdzielone. Kinematyka losowa występuje np. w procesie kulowania, drążenia elektroerozyjnego, procesach udarowo-ściernych, elektrochemicznych, strumieniowo-erozyjnych. Kinematyka sprzężona i niesprzężona w stosunku do kinematyki losowej charakteryzuje się ukierunkowanymi ruchami względnymi narzędzia i przedmiotu obrabianego [219, 227, 322, 324].

Połączenie różnego rodzaju narzędzi z kinematyką powoduje powstanie zróżnicowanego ukształtowania geometrycznego powierzchni, np. połączenie narzędzia z określoną geometrią ostrza z kinematyką sprzężoną powoduje ukształtowanie struktury powierzchni o charakterze anizotropowym okresowym (toczenie wykończeniowe). Połączenie narzędzia z określonym zarysem powierzchni kształtującej z kinematyką losową zapewnia z kolei powstanie powierzchni o charakterze izotropowym losowym (kulkowanie), a połączenie narzędzia z losową geometrią ostrzy z kinematyką niesprzężoną prowadzi do kształtowania powierzchni anizotropowych losowych (szlifowanie płaskie, walcowe wgłębne).

Ukształtowanie geometryczne powierzchni powstających w wyniku możliwych kombinacji geometrii narzędzi i kinematyki ruchów względnych przedstawiono na rysunku 2.20.

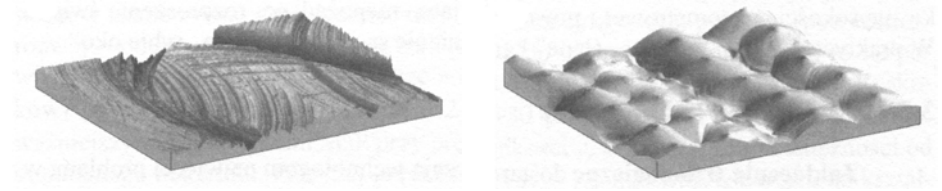


Rys. 2.20. Schemat kształtowania SGP w procesach obróbkowych [227]

W procesach obróbkowych występują różnego rodzaju zakłócenia, które powodują zmiany w strukturze geometrycznej powierzchni, szczególnie w odniesieniu do obróbki narzędziami z określoną geometrią ostrza. Zakłócenia kształtowania struktury geometrycznej powierzchni mogą być spowodowane czynnikami o charakterze geometrycznym, kinematycznym, dynamicznym lub tribologicznym [170, 224, 228, 231].

Zakłócenia geometryczne są następstwem przypadkowych odchyłek czynnego zarysu kształtującego ostrza narzędzia skrawającego od zarysu nominalnego. Zakłócenia kinematyczne powstają w następstwie charakterystycznych cech kinematyki procesu technologicznego oraz odchyłek łańcucha kinematycznego. Skutki tych zakłóceń dotyczą zarówno chropowatości, jak i kierunkowości. Przykład zakłóceń kinematycznych przedstawiono na rysunku 2.21.

a) b)

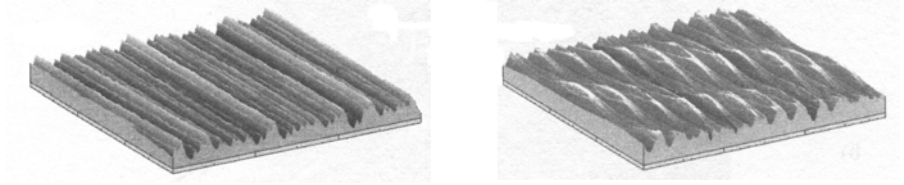


Rys. 2.21. Zakłócenia kinematyczne SGP: a) po frezo-toczeniu czołowym, b) po laserowym stopowaniu [227]

Na powierzchni kształtowanej frezo-toczeniem czołowym zakłócenia kinematyczne przyjmują postać skrzyżowanych śladów zarysowania powierzchni obrobionej podczas powtórnego (teoretycznie jałowego) przejścia zęba. Dla powierzchni po laserowym nanoszeniu powłoki zakłócenia widoczne w części środkowej są natomiast wynikiem niedokładnego i nierównomiernego przemieszczenia wiązki laserowej.

Zakłócenia dynamiczne są najczęściej skutkami drgań samowzbudnych lub wzbudzonych, powstających w trakcie realizacji procesów obróbkowych. Na rysunku 2.22 przedstawiono przykład zakłóceń dynamicznych.

a) b)



Rys. 2.22. Zakłócenia dynamiczne SGP toczonej: a) bez drgań, b) z drganiami samowzbudnymi [227]

Regularna struktura anizotropowa uzyskana po toczeniu została zakłócona – widoczne zmiany śladów obróbki wywołane są drganiami wierzchołka naroża.

Zakłócenia spowodowane drganiami cechują się z reguły strukturą o przypadkowej okresowości [219, 227, 328].

Zakłócenia natury tribologicznej mogą mieć różne przyczyny powstawania i są zazwyczaj wynikiem [92, 170, 228]:

- narostu na krawędzi skrawającej,
- zadziorów na powierzchni obrobionej,
- zjawisk hydrodynamicznych w technologicznej warstwie wierzchniej na styku narzędzia z powierzchnią obrobioną,
- poprzecznego płynięcia plastycznego materiału w strefie skrawania.

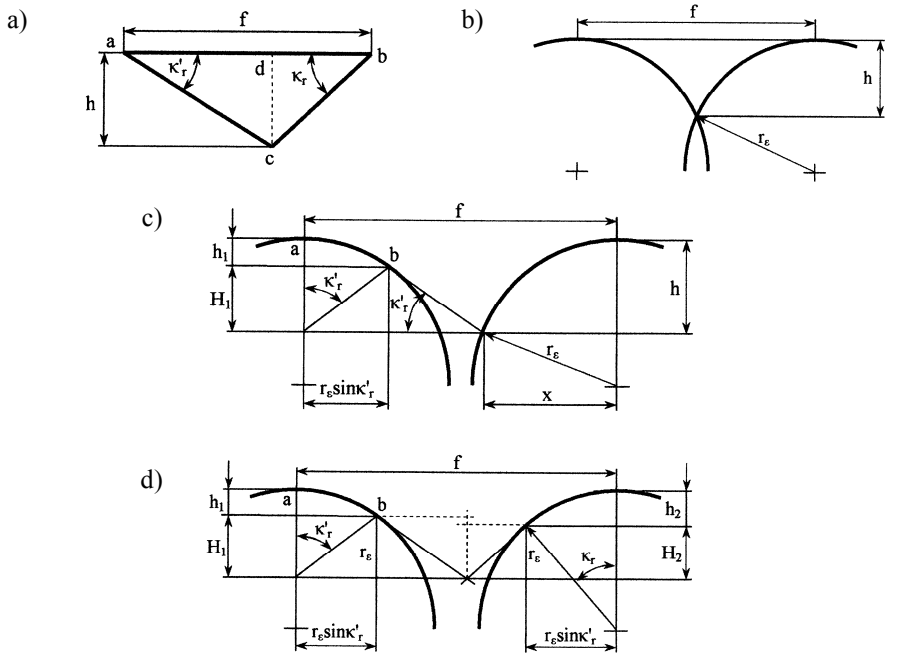
Zakłócenia spowodowane narostem są dość powszechnie znane. Narost nie jest tworem stałym, znajduje się w stanie równowagi dynamicznej. W trakcie jednego cyklu, który trwa bardzo krótko (od 0,01 do 0,2 ms), następują: powstanie, rozwój oraz oderwanie narostu. Ślady po narostach są najpoważniejszymi zakłóceniami SGP przy prędkości skrawania od 1,0 do 1,5 $m \cdot s^{-1}$ w zależności od obrabianego materiału.

W tym samym zakresie prędkości skrawania, oprócz narostów na powierzchni obrobionej, często występują zadziory spowodowane charakterystycznymi zmianami w procesie tarcia na wyjściowym odcinku powierzchni styku narzędzia z przedmiotem obrabianym. Udział zadziorów w zakłóceniach SGP jest jednak mniejszy niż wywołanych narostem [39, 227, 329].

Zjawiska hydrodynamiczne zakłócające tworzenie się struktury powierzchni występują podczas obróbki narzędziami z określoną geometrią ostrzy przy dużej prędkości skrawania ($v_c > 2{,}5 \div 3$ $m \cdot s^{-1}$). Zakłócenia spowodowane poprzecznym płynięciem warstwy wierzchniej obrabianego materiału występują natomiast w całym zakresie stosowanych w praktyce prędkości skrawania [228].

Teoretycznie bez uwzględniania zakłóceń, gdy weźmie się pod uwagę tylko aspekt geometryczno-kinematyczny, wysokość nierówności pozostawianych na powierzchni obrobionej, a także rozmieszczenie śladów obróbki zależą od kształtu i pola przekroju resztkowego warstwy skrawanej (rys. 2.23). Oznacza to, że o wysokości chropowatości powierzchni (h) decyduje konfiguracja naroża jako czynnik geometryczny (r_ε, κ_r, κ'_r) oraz posuw (f) jako czynnik kinematyczny [92, 112, 255]. Ten drugi czynnik determinuje ponadto układ śladów obróbki, ma więc wpływ na izotropię obrabianej powierzchni.

W praktyce wskutek różnych oddziaływań procesu (narostu, tarcia, odkształceń sprężysto-plastycznych, zużycia, drgań) uzyskana nierówność powierzchni może znacznie różnić się od założonej teoretycznej.



Rys. 2.23. Kształt nierówności powierzchni dla różnych odwzorowań geometryczno-kinematycznych: a) prostoliniowy, b) krzywoliniowy, c) łukowo-liniowy I typu, d) łukowo-liniowy II typu [92]

Odwzorowanie prostoliniowe (rys. 2.23a) jest konsekwencją przyjęcia modelu idealnie ostrego ostrza, tj. gdy promień naroża $r_\varepsilon \to 0$.

Odwzorowanie krzywoliniowe (łukowe) (rys. 2.23b) pojawia się w przypadku użycia tylko krzywoliniowej części krawędzi skrawającej (naroża) o promieniu r_ε. Odwzorowanie łukowe ma praktyczne znaczenie w obróbce dokładnej, gdy posuw (f) jest odpowiednio mały.

Odwzorowanie łukowo-liniowe I typu (rys. 2.23c) dotyczy skrawania jedynie prostoliniowym odcinkiem pomocniczej krawędzi skrawającej.

Odwzorowanie łukowo-liniowe II typu (rys. 2.23d) występuje gdy w kształtowaniu weźmie udział również prostoliniowy odcinek głównej krawędzi skrawającej.

Podczas procesów obróbkowych na kształtowaną strukturę geometryczną powierzchni oddziałują również często używane ciecze chłodząco-smarujące oraz ewentualne ich zanieczyszczenie. Wywierają one wpływ na trwałość ostrzy narzędzi skrawających, dokładność wymiarowo-kształtową obrobionych powierzchni przedmiotów, a także oddziałują na proces kształtowania wiórów i zjawiska występujące w strefie skrawania [112, 223].

W ostatnich latach pomimo wielu zalet wynikających ze stosowania cieczy chłodząco-smarujących coraz częściej uznaje się je za czynnik niepożądany w procesie skrawania. Ocena taka wynika nie tylko ze względów ekonomicz-

nych, gdyż szacuje się, że stosowanie cieczy obróbkowych stanowi 16,8% ogółu kosztów wytwarzania, ale również z uwagi na aspekty ekologiczne i konieczność dostosowania się do coraz bardziej rygorystycznych przepisów związanych z ochroną środowiska i BHP [105, 128, 145]. Składowanie i utylizacja zużytych cieczy obróbkowych stanowią również potencjalne zagrożenie dla środowiska naturalnego [99, 225, 321].

Jednym ze sposobów ograniczania ilości cieczy chłodząco-smarujących w procesie skrawania jest obróbka z minimalnym wydatkiem cieczy obróbkowej (MQL – *Minimum Quantity Lubrication*). Istota jej polega na doprowadzeniu w określonym czasie możliwie najmniejszej ilości płynu obróbkowego, najczęściej wynoszącej mniej niż 50 $ml \cdot h^{-1}$, jak najbliżej miejsca styku ostrza narzędzia z obrabianym materiałem. Metoda ta jest coraz częściej stosowana w praktyce przemysłowej, czemu sprzyjają rozwój materiałów narzędziowych i ich powłok, zwiększających wytrzymałość ostrza w trudnych warunkach skrawania, a także nowe rozwiązania konstrukcyjne obrabiarek, narzędzi i oprzyrządowania [15, 71, 105, 146, 155, 156, 165, 357].

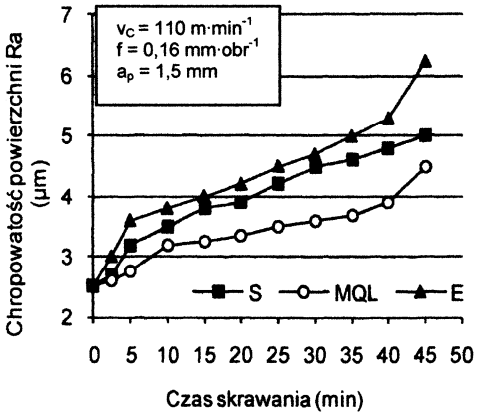
Coraz większe znaczenie ze względów ekonomicznych, ekologicznych, technologicznych i ochrony zdrowia uzyskuje obróbka na sucho – bez stosowania cieczy chłodząco-smarującej. Jej wprowadzaniu również sprzyjają doskonalenie właściwości użytkowych nowych materiałów narzędziowych i powłok oraz zmiana konstrukcji obrabiarek i narzędzi [222, 249, 321, 355]. Podczas obróbki na sucho powstające ciepło gromadzi się w narzędziu, w materiale obrabianym i wiórach. Część tego ciepła bezpośrednio odprowadzana jest do otoczenia, a pozostała część jak najszybciej powinna być 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 poprzez zastosowanie narzędzia o odpowiednim kształcie [140, 147, 351], które w ten sposób częściowo przejmuje dotychczasowe funkcje cieczy chłodząco-smarującej.

W obróbce na sucho funkcje realizowane przez ciecz chłodząco-smarującą oprócz narzędzia przejmuje również obrabiarka. Konstrukcja obrabiarki, a w szczególności układ przestrzeni roboczej, powinna przeciwdziałać oddziaływaniu ciepła zawartego w wiórach na dokładność obrobionego przedmiotu [82, 319].

W źródłach literaturowych dotyczących oddziaływania czynników ekologicznych w procesach obróbkowych dominują informacje o ich wpływie na trwałość ostrzy narzędzi skrawających i zjawiska występujące w strefie skrawania [9, 55, 59, 62, 108, 144, 162, 163, 236, 321]. Zdecydowanie mniej jest informacji o oddziaływaniu na kształtowaną strukturę powierzchni, zwłaszcza jej kierunkowość i izotropowość. Generalnie można stwierdzić, że w przypadku zastosowania minimalnego chłodzenia i smarowania w postaci mieszanki powietrza z olejem lub wodą uzyskuje się mniejsze wartości chropowatości niż w przypadku obróbki na sucho lub z konwencjonalnym podawaniem emulsji [56, 57, 282, 317, 350]. Współczynnik izotropowości jest także mniejszy.

W przypadku obróbki na sucho i z konwencjonalnym chłodzeniem i smarowaniem strefy skrawania następuje wzrost chropowatości powierzchni w wyniku większych temperatur i naprężeń działających na ostrze, większy też jest współczynnik izotropowości.

Na rysunku 2.24 przedstawiono przykładowy wykres zmian chropowatości z pracy [57], w której zaprezentowano wyniki badań wpływu udziału cieczy chłodząco-smarującej przy toczeniu stali 34CrNiMo6. Przy minimalnym chłodzeniu i smarowaniu za pomocą strumienia mieszaniny powietrza z olejem podawanego w ilości 60 $ml \cdot h^{-1}$ i pod ciśnieniem 0,7 MPa uzyskano najmniejszą chropowatość.



Rys. 2.24. Chropowatość powierzchni po obróbce toczeniem na sucho (S), z minimalnym chłodzeniem i smarowaniem (MQL) i emulsją (E) w zależności od czasu skrawania [57]

Z analizy przebiegu krzywych wynika, że najmniejsze wartości chropowatości występują przy MQL oraz również, że wartości parametru chropowatości w funkcji czasu obróbki z MQL rosną znacznie wolniej.

W pracach [8, 57, 60, 178, 340] dodatkowo wykazano, że wpływ MQL na kształtowaną SGP zależy również od pozostałych uwarunkowań obróbki, tj. parametrów obróbki, zjawiska narostu, twardości materiału obrabianego. W pracy [178] wykazano ponadto, że wpływ chłodzenia i smarowania na chropowatość powierzchni po toczeniu stali średniowęglowej jest zauważalny w zakresie małych prędkości skrawania – rzędu 30 $m \cdot min^{-1}$ i dużych posuwów. Wraz ze wzrostem prędkości skrawania następuje ograniczenie wpływu sposobu chłodzenia i smarowania na chropowatość, a po przekroczeniu 200 $m \cdot min^{-1}$ wpływ ten praktycznie zanika. Wyniki badań przedstawione w pracy [8] wykazały, że zastosowanie MQL w postaci mieszaniny oleju roślinnego z powietrzem dostarczanego w ilości 50 $ml \cdot h^{-1}$ i pod ciśnieniem 0,13 MPa do toczenia stali wysokowęglowej o twardości 62÷64 HRC wpływa istotnie na zmniejszenie chropowatości powierzchni.

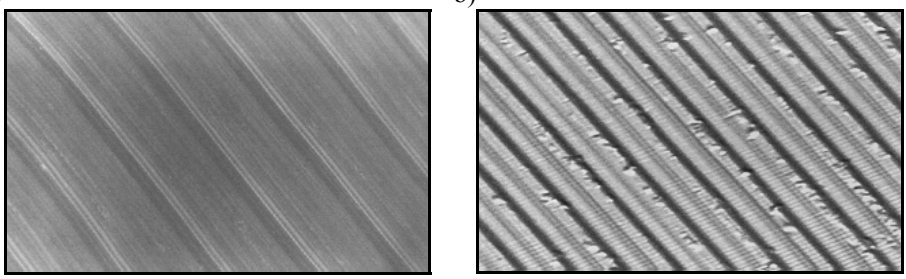
Analizując stan wiedzy na podstawie literatury, można stwierdzić, że liczne prace dotyczą wpływu technologii wytwarzania na kształtowaną SGP. Część z nich dotyczy analiz opartych na zależnościach wynikających z teorii obróbki [23, 26, 72, 81, 90, 91, 111, 123, 126, 152, 164, 166, 196, 209, 211, 243], a część – badań doświadczalnych wpływu różnych czynników [3, 5, 43, 51, 53, 78, 88, 107, 117, 124, 129, 132, 153, 200, 269, 274, 308]. Przykładowo w pracach [90, 91] przedstawiono teoretyczny model, w którym chropowatość zależy od posuwu, promienia i minimalnej grubości warstwy skrawanej. Autorzy pracy [166] opracowali natomiast model uzyskiwania profili po toczeniu przy znanych parametrach drgań. Symulację komputerową kształtowania SGP dla różnych modeli odwzorowania kinematyczno-geometrycznego ostrza opisano również w pracy [123], a modelowanie chropowatości po obróbce frezowaniem – w pracach [126, 152, 196].

W pracach dotyczących badań doświadczalnych najczęściej określa się wpływ takich parametrów obróbki, jak: posuw, prędkość, promień krawędzi ostrza, głębokość skrawania. Autor pracy [51] stwierdził, że prędkość skrawania przy toczeniu wpływa najbardziej na uzyskiwaną chropowatość. Z kolei przeciwstawne wnioski można znaleźć w pracy [200], w której stwierdzono, że największy wpływ wywiera posuw, następnie promień krawędzi ostrza noża, a prędkość skrawania wywiera najmniejszy wpływ. Podobne wnioski można znaleźć w [43]. W pracach tych przytoczono również wiele opracowanych modeli matematycznych, pozwalających m.in. na optymalizację chropowatości powierzchni dla różnych obrabianych materiałów i metod obróbki [3, 43, 78] przy różnych kryteriach, także eksploatacyjnych.

Przedstawione w analizowanych pracach relacje między technologią wytwarzania a konstytuowaną SGP oparte są na parametrach chropowatości. Zdecydowanie mniej liczne są publikacje, opisujące ilościowe uzależnienie kierunkowości jako cechy kształtowanej SGP od uwarunkowań obróbki [98, 307, 330, 331]. Uzależnienie to ujmowane jest częściej w sposób jakościowy, czego przykładem są różnego rodzaju atlasy kształtowanych charakterystycznych powierzchni [219, 227, 287, 322, 324].

Na rysunku 2.25 przedstawiono przykładową strukturę geometryczną powierzchni po toczeniu, która ma równoległe ślady po obróbce, a promienie zaokrąglenia wierzchołków wzdłuż śladów obróbki są stosunkowo duże przy dość małym pochyleniu nierówności [11, 197, 227, 287]. Na takie ukształtowanie i usytuowanie śladów obróbki wpływ mają parametry obróbki i geometria ostrza.

a) b)



Rys. 2.25. Struktury po toczeniu wykończeniowym: a) aluminium – dla $v_C = 18{,}5\ m \cdot s^{-1}$ i $f = 0{,}17\ mm \cdot obr^{-1}$, b) stali – dla $v_C = 3{,}2\ m \cdot s^{-1}$ i $f = 0{,}15\ mm \cdot obr^{-1}$ [227]

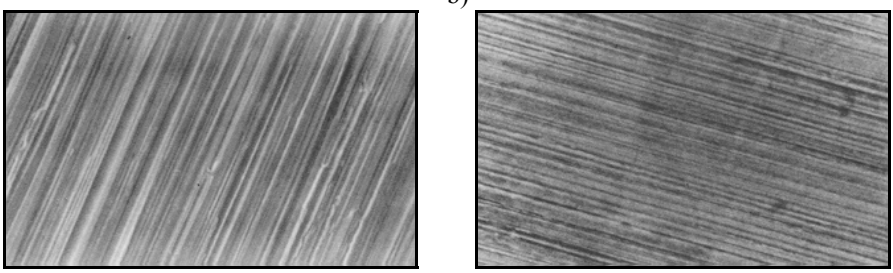
Profile SGP po toczeniu, prostopadłe do śladów obróbki, mogą mieć charakter mieszany bądź losowy, natomiast uzyskane równolegle do śladów obróbki – charakter losowy [255].

W licznych przypadkach procesów wytwarzania ostatnią operacją kształtowania SGP jest obróbka ścierna. Umożliwia ona nadawanie dużej gładkości i dokładności, niezależnie od twardości obrabianego elementu. W monografii analizowane SGP również zostały ukształtowane taką technologią jako dominującą obróbką wykończeniową.

Cechą charakterystyczną obróbki ściernej jest równoczesne oddziaływanie dużej liczby ostrzy ziarn ściernych na obrabianą powierzchnię. Ostrza charakteryzują się losowo zmiennymi w szerokich zakresach wymiarami, kształtem i położeniem, wskutek czego w procesie obróbki mogą występować równocześnie różne procesy tribologiczne (np. mikroskrawanie, bruzdowanie, tarcie) [112, 219].

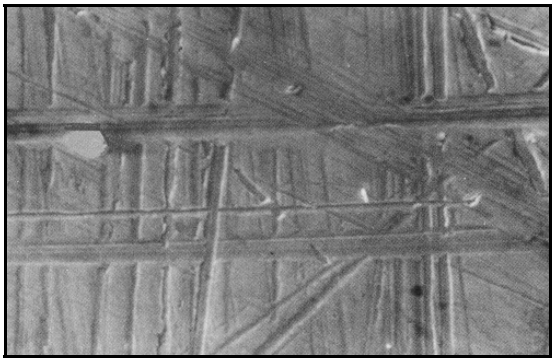
W trakcie szlifowania obwodowego SGP wskutek oddziaływań ziarn ściernych powstaje układ równoległych rowków (rys. 2.26) o długości kilku milimetrów oraz szerokości i głębokości od setnych części do kilku mikrometrów, których położenie i wymiary są losowe. Taki obraz śladów obróbki jest wynikiem kinematyki procesu szlifowania.

a) b)



Rys. 2.26. Struktury po szlifowaniu obwodowym powierzchni stalowych: a) płaskich – dla $v_C = 22{,}1\ m \cdot s^{-1}$ i $f = 4\ mm$ na przejście, b) walcowych – dla $v_C = 23\ m \cdot s^{-1}$ i $f = 18\ mm \cdot obr^{-1}$ [227]

Struktury uzyskane szlifowaniem czołowym tworzą krzyżujące się ślady obróbki (rys. 2.27), wskutek czego grzbiety nierówności są poprzecinane.



Rys. 2.27. Struktura po szlifowaniu czołowym powierzchni stalowych płaskich – dla $v_C = 31\ m \cdot s^{-1}$ i f = 0,008 mm na przejście [227]

Wierzchołki mają różnorodne kształty z przewagą piramidalnych o zaokrąglonych szczytach. Rozkłady rzędnych i wierzchołków profilu są zbliżone do rozkładów powierzchni szlifowanych obwodowo, co jest rezultatem podobieństwa kinematyki obydwu odmian szlifowania.

2.3.2. Czynniki determinujące transformację eksploatacyjnej warstwy wierzchniej

Czynniki determinujące transformację EWW jak już wcześniej zasygnalizowano zależą od przyjętej technologii eksploatacji – wymuszeń zewnętrznych i czasu ich oddziaływania oraz rodzaju styku. Transformacja EWW zachodzi inaczej dla styku niekonforemnego, a inaczej dla konforemnego. Z uwagi na zakres tematyczny monografii analizowane będą czynniki determinujące transformację WW elementów o styku konforemnym, a więc wywołane tarciem ślizgowym.

W parze kinematycznej z tarciem ślizgowym dominującym procesem zużywania jej elementów jest ścieranie występujące w różnych formach [143, 216]. Na podstawie analizy mechanizmu tego procesu przyjmuje się, że w transformacji WW w węźle z tarciem ślizgowym (styk konforemny) istotne znaczenie mają następujące wymuszenia eksploatacyjne [216, 263, 281, 332]:

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

Naciski jednostkowe decydują o rzeczywistej powierzchni kontaktu elementów pary ciernej, co powoduje, że istotnie wpływają na wartość współczynnika tarcia – ze wzrostem wartości nacisków jednostkowych zwiększają się

opory tarcia, ponieważ większe są powierzchnie styku [151]. Istotny wpływ na przebieg transformacji EWW w tym aspekcie ma kierunkowość struktur współpracujących powierzchni, szczególnie ich wzajemne usytuowanie. W przypadku struktur izotropowych rzeczywista powierzchnia kontaktu jest taka sama bez względu na wzajemne położenie współpracujących powierzchni. Inaczej jest w przypadku powierzchni anizotropowych. Kąt skrzyżowania śladów obróbki ma decydujący wpływ na rzeczywistą powierzchnię kontaktu, a tym samym na naciski jednostkowe.

Kolejnymi istotnymi wymuszeniami eksploatacyjnymi w parach kinematycznych ze stykiem konforemnym są prędkość względnego ruchu ich elementów i wyzwalane wówczas ciepło. W pracy [151] wykazano, że prędkość i temperatura węzła tarcia są wzajemnie zależne, przy czym stwierdzono, że decydującym parametrem w przebiegu zużywania jest temperatura. Potwierdzeniem istotności wpływu prędkości na temperaturę w obszarze styku są rezultaty badań przedstawionych w pracach [151, 263]. Należy zauważyć, że kierunkowość struktury współpracujących powierzchni w omawianym przypadku wymuszeń ma podobny wpływ jak dla nacisków jednostkowych.

Temperatura jako wymuszenie ma istotne i wielostronne znaczenie dla przebiegu transformacji. Pod wpływem ciepła mogą nastąpić zmiany strukturalne i fazowe materiału, zmiany wartości, a nawet znaku naprężeń własnych, zmiany wartości parametrów wytrzymałościowych, przyspieszenie (w przypadku wzrostu temperatury) reakcji chemicznych, jakie mogą zachodzić przy udziale trzech środowisk: aktywnych składników środków smarowych, otoczenia i materiału podłoża. W wyniku tych zmian czas, w którym pary kinematyczne realizują poprawnie nałożone zadania, skraca się, czyli zmniejsza się trwałość mechanizmów, w których pary kinematyczne występują.

Wpływ na zmiany stanu EWW mogą mieć również: czynnik smarujący (obecność aktywnych składników) oraz szeroko rozumiane oddziaływanie środowiska. Decydują one o rodzaju tarcia i tworzeniu się warstwy granicznej [281, 291, 332].

W procesie zużywania tribologicznego, wywołanego przez wymienione wymuszenia, w obszarach styku mogą następować zmiany: masy, struktury lub własności warstwy wierzchniej. Wymienione zmiany mogą także występować łącznie w różnych kombinacjach i ze zróżnicowaną intensywnością. Brak jest informacji, czy mają one wpływ na zmiany dotyczące kierunkowości eksploatowanych powierzchni.

Wymienione wymuszenia eksploatacyjne, które mają decydujący wpływ na przebieg transformacji TWW, mają charakter zdeterminowany, są więc sterowalne.

Do grupy losowych wymuszeń eksploatacyjnych, które także w pewnym stopniu determinują przebieg transformacji, zaliczyć można, np. drgania spowodowane niewyrównoważeniem elementów wirujących lub postępującym procesem zużywania czy też zanieczyszczenie otoczenia pracy [97, 151].

3. STAN WARSTWY WIERZCHNIEJ A WYBRANE CECHY UŻYTKOWE

Podstawowe cechy użytkowe typowych par kinematycznych, występujących powszechnie w budowie maszyn, których funkcjonowanie jest związane z tarciem tocznym oraz ślizgowym, można zaklasyfikować do następujących grup [37, 150, 151, 336]:

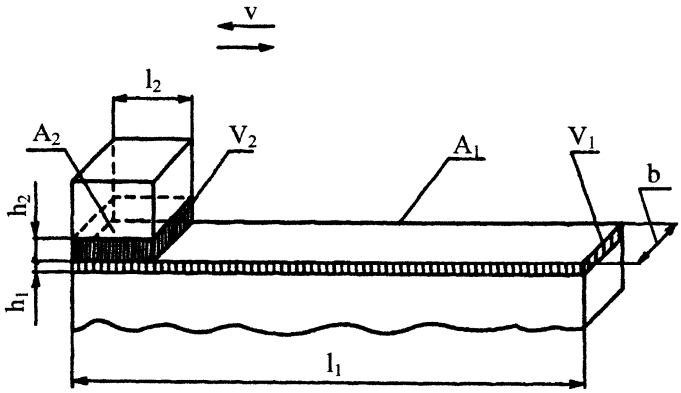
- tribologiczne,
- wytrzymałościowe,
- antykorozyjne,
- termodynamiczne,
- dekoracyjne.

Z uwagi na tematykę pracy szczegółowo przeanalizowano czynniki determinujące charakterystyki tribologiczne. Do cech tribologicznych należą te, które warunkują wzajemne oddziaływanie powierzchni i otoczenia ciał będących w styku tarciowym. Tarcie jest jednym z najpowszechniejszych zjawisk w przyrodzie. Procesy tarcia wywołują w sposób nieunikniony zjawisko zużywania się elementów współpracujących ciernie, objawiające się ubytkiem materiału z powierzchni trących i zachodzeniem zmian stanu warstwy wierzchniej, co często przyczynia się do powstawania uszkodzeń w pracujących urządzeniach technicznych.

Do najważniejszych cech tribologicznych można zaliczyć: zużywanie tribologiczne i odporność na zużywanie oraz opory ruchu i związany z tym współczynnik tarcia.

3.1. ODPORNOŚĆ NA ZUŻYWANIE

Zużywanie elementów par kinematycznych z reguły powoduje zmiany w ich warstwie wierzchniej, które są niekorzystne pod względem założonej funkcji tej pary. Zmiany te powstają wskutek wzajemnego oddziaływania współpracujących powierzchni elementów tworzących pary i mogą być intensyfikowane otoczeniem środowiska pracy [52, 97, 106, 138, 151, 160, 186, 281, 298, 332, 336]. Skutkiem procesu oddziaływania jest zużycie, które może być mierzone objętościowo, liniowo lub wagowo (rys. 3.1) [121, 151, 266, 267].



Rys. 3.1. Schemat zużywania elementów przy styku konforemnym: h – zużycie mierzone liniowo, V = lbh = Ah – zużycie mierzone objętościowo, m = Vρ – zużycie mierzone wagowo (masowo), A – nominalna powierzchnia styku, ρ – gęstość ciała [151]

Zużycie mierzone liniowo − h, objętościowo − V lub wagowo (masowo) − m stanowi bezpośrednią miarę zużywania. W literaturze używa się również miar względnych, odniesionych do jakiegoś parametru. Wśród nich dominuje intensywność zużywania I, będąca odniesieniem ubytku objętościowego (ΔV), masowego (Δm) lub liniowego (Δl) do czasu (τ_t), drogi tarcia (L_t) lub pracy tarcia (P_t). Intensywność zużywania można więc zapisać odpowiednio:

$$I_\tau = \frac{Z}{\tau_t}; \qquad I_L = \frac{Z}{L_t}; \qquad I_P = \frac{Z}{P_t} \tag{3.1}$$

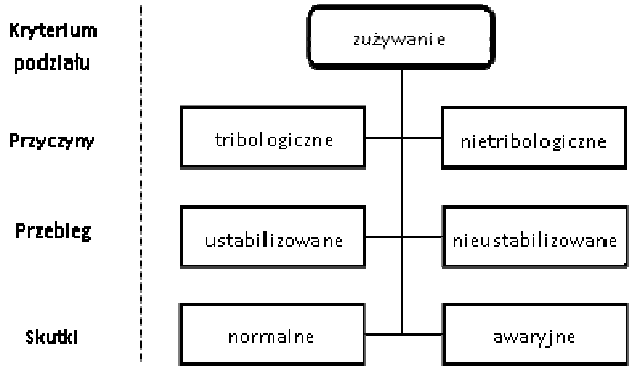
przy czym: Z może przyjmować postaci: ΔV, Δm, Δl.

Kolejną cechą, którą w literaturze przyjmuje się do opisu zachodzących zmian podczas współpracy elementów par ciernych, jest odporność na zużywanie, czyli odwrotność intensywności zużywania [151, 266]. Wielkość tę można również interpretować energetycznie jako pracę właściwą zużywania, czyli stosunek pracy tarcia do masy produktów zużywania [263, 265], lub gęstość energii tarcia, czyli stosunek pracy tarcia do objętości usuniętego materiału [75].

Ukształtowanie struktury powierzchni, w tym stopień jej izotropowości, ma wpływ na intensywność zużywania. Ze względu na styk współpracujących powierzchni, na który ma wpływ stopień izotropowości zużywanie może być przerywane lub ciągłe. Przy małym stopniu izotropowości (wyraźnej kierunkowości) grzbiety nierówności przesuwają się po sobie, natomiast przy dużym stopniu izotropowości wierzchołki mikronierówności opierają się wzajemnie lub trafiają we wgłębienia, bruzdują przeciwległą powierzchnię lub ulegają ścięciu. W drugim przypadku produktów zużywania będzie więcej i powierzchnie mogą wykazywać mniejszą odporność na zużywanie.

Ogólnej klasyfikacji procesów zużywania można dokonać, gdy przyjmie się następujące kryteria [151] (rys. 3.2):

- przyczyny wywołujące proces,
- jego przebieg,
- wywołane procesem skutki.

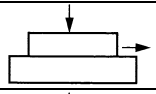
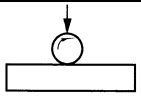
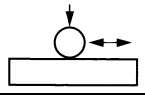


Rys. 3.2. Klasyfikacja procesów zużywania elementów maszyn dla różnych kryteriów

Do zużywania tribologicznego zalicza się zużywanie ścierne, zmęczeniowe, adhezyjne, wodorowe oraz przez utlenianie, natomiast jako nietribologiczne przyjmuje się skutki procesów korozyjnych i erozyjnych.

W tabeli 3.1 przedstawiono zakres występowania dominujących tribologicznych procesów zużywania przy różnym charakterze styku.

Tabela 3.1. Zakres występowania podstawowych form zużywania tribologicznego [214]

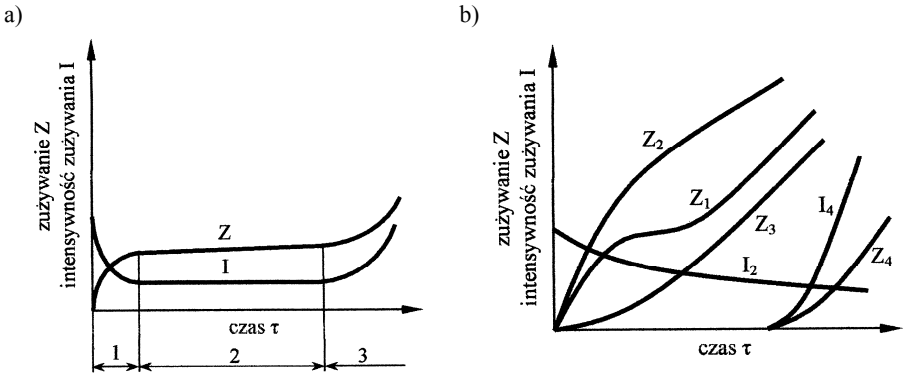
Pary kinematyczne	Rodzaj zużycia Dominujące zużywanie w parze kinematycznej			
	zmęczeniowe pitting	ścierne	adhezyjne	przez utlenianie
	○	●	●	●
	●	◐	◐	●
	zużycie cierno-korozyjne (fretting), połączony wpływ wszystkich rodzajów zużycia			

● występuje z dużym nasileniem

◐ występuje z małym nasileniem

○ nie występuje

Występujące podczas współpracy elementów maszyn zużywanie może mieć charakter ustabilizowany lub nieustabilizowany. Schematycznie charakterystyki obydwóch rodzajów procesów przedstawiono na rysunku 3.3.



Rys. 3.3. Charakterystyki procesów zużywania: a) ustabilizowany, b) nieustabilizowany [151]

Z uwagi na zadanie spełniane przez parę kinematyczną pożądany jest przebieg ustabilizowany zużywania (rys. 3.3a – tzw. krzywa Lorenza), gdy para dłuższy czas zachowuje założone cechy użytkowe na stałym poziomie. Zużywanie nieustabilizowane (rys. 3.3b), niekorzystne pod względem cech użytkowych i spełniania swojej funkcji przez parę kinematyczną, zachodzi w określonych warunkach, a jego przyczyną mogą być np. produkty zużywania znajdujące się w niewymienionym i niefiltrowanym oleju – krzywa z indeksem 1, utwardzanie się metali pod wpływem obciążeń normalnych – krzywe z indeksem 2 (zmniejszanie się intensywności zużywania), zużywanie się przeciwzużyciowej warstewki powierzchniowej – krzywa z indeksem 3 (zwiększanie się intensywności zużywania), cykliczne naprężenia stykowe – krzywe z indeksem 4 (pewien czas pracy niemal bez zużycia) [151].

Pod względem kształtowania przyszłej funkcjonalności pary kinematycznej najistotniejszy okres pracy to czas, gdy występuje największa dynamika zmian cech. W przypadku zużywania ustabilizowanego jest on wyraźny – okres pierwszy (1), tzw. okres docierania (dopasowywania) o zmiennej, ale malejącej intensywności zużywania. Przy przebiegu nieustabilizowanym intensywność zużywania jest zmienna w czasie niemal całego procesu eksploatacji.

W literaturze można znaleźć liczne informacje o badaniach dotyczących okresu docierania, gdy zmiana cech jest dynamiczna [6, 7, 16, 44, 46, 47, 122, 181, 189, 217, 221, 261, 262]. Jednak w pracach tych cechy tribologiczne w okresie docierania uzależnione są głównie od parametrów chropowatości struktury powierzchni, natomiast zdecydowanie rzadziej od kształtu mikronierówności w tym ich ukierunkowania. Stopień izotropowości współpracujących powierzchni w okresie docierania (1) będzie się niewątpliwie zmieniał: skracał

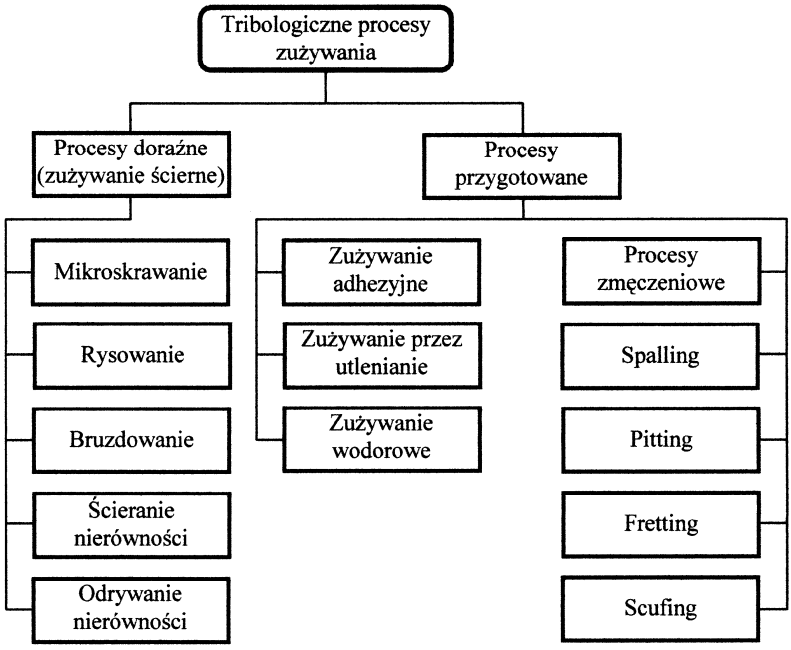
się lub wydłużał. Po dotarciu – w okresie ustabilizowanej eksploatacji (2) – będzie wpływał na warunki smarowania i opory ruchu.

Celem badań okresu docierania jest to, aby generował on małe zmiany, co zapewnia względną stałość uzyskanych cech potencjalnych TWW. Jednocześnie dąży się do tego, aby okres ustabilizowanej eksploatacji, w którym intensywność zużywania jest mała i niemal stała, był możliwie najdłuższy, co zapewni stałość założonych cech użytkowych.

Oddzielenie materiału w procesie zużywania jest wynikiem doraźnego, czysto mechanicznego oddziaływania stykających się elementów, może być też poprzedzone innymi zjawiskami natury chemicznej, które powodują mechaniczne oddzielenie materiału elementu lub je ułatwiają. Mając na uwadze te mechanizmy procesy niszczenia można podzielić na:

- doraźne,
- przygotowane.

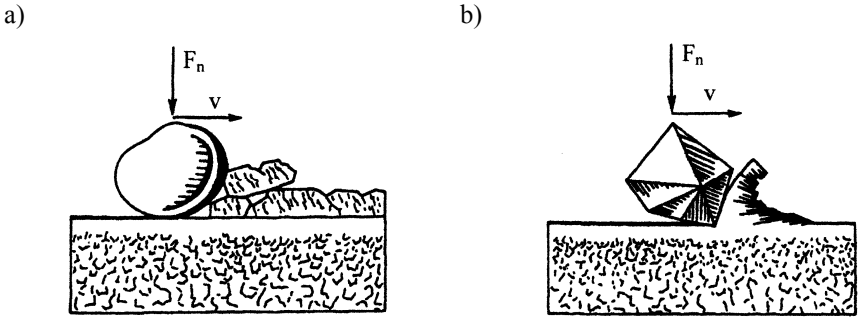
Klasyfikację zużywania tribologicznego, uwzględniającą proces niszczenia warstwy wierzchniej, przedstawiono na rysunku 3.4 [97, 151].



Rys. 3.4. Klasyfikacja zużywania tribologicznego

Zużywanie ścierne występuje wtedy, gdy proces niszczenia warstwy wierzchniej przyjmuje postać: mikroskrawania, rysowania, bruzdowania, ścinania nierówności lub odrywania nierówności powierzchni. W procesie zużywania ściernego ubytek materiału WW jest wynikiem głównie oddziaływania me-

chanicznego. W obszary tarcia współpracujących elementów dostają się twarde cząstki ciał obcych i działają jak mikroostrza skrawające. Taką samą rolę mogą spełniać wystające nierówności twardszego materiału współpracujących powierzchni [97]. Na rysunku 3.5 przedstawiono schematycznie zużywanie ścierne.



Rys. 3.5. Schemat zużywania ściernego: a) postać chemiczno-mechaniczna (oddzielanie warstwy tlenków), b) postać mechaniczna (mikroskrawanie) [151]

Ścieranie jest najpowszechniejszym rodzajem zużywania. Proces ten może być głównym procesem zużywania bądź też może intensyfikować inny rodzaj zużywania. Zużywanie ścierne stanowi około 80÷90% wszystkich przypadków zużywania tribologicznego [39, 151]. Dominuje ono przy braku smarowania węzła ciernego – w przypadku tarcia suchego lub gdy smarowanie jest niedostateczne – tarcia mieszanego. W warunkach tarcia płynnego może ono wystąpić, gdy środek smarny zawiera cząstki ścierne (produkty zużywania lub zanieczyszczenia). Gdy współpracują ze sobą materiały o dużej różnicy twardości, to nierówności powierzchni elementu twardszego będą bruzdowały lub mikroskrawały powierzchnię elementu miękkiego (rys. 3.6).

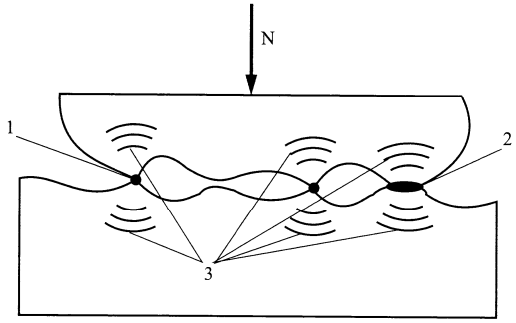
Należy przy tym zauważyć, że kierunkowość SGP ma istotny wpływ na przebieg i intensywność zużywania ściernego. Kąt współpracy struktur wynikający z przecięcia ich kierunkowości będzie wpływał na mechanizm zużywania. Dodatkowo przy dużej różnicy twardości między współpracującymi powierzchniami grzbiety kierunkowości twardszego materiału będą inicjować mikroskrawanie. Przy dużym stopniu izotropowości ze względu na charakter mikronierówności występują warunki sprzyjające bruzdowaniu.

a) b)

Rys. 3.6. Schemat zużywania ściernego w zależności od kąta spływu wióra: a) bruzdowanie – mały kąt, b) mikroskrawanie – duży kąt [151]

Mikroskrawanie jest bardziej intensywną postacią zużywania ściernego niż bruzdowanie. Mikroskrawanie powoduje ubytek materiału już po pierwszym przejściu elementu ścierającego, natomiast bruzdowanie powoduje przede wszystkim odkształcenia plastyczne warstwy wierzchniej, a dopiero po wielokrotnym przejściu elementu bruzdującego mogą oddzielać się cząstki z WW wskutek jej zmęczenia.

Zużywanie adhezyjne jest rezultatem niszczenia WW współpracujących elementów w wyniku powstawania i rozrywania połączeń adhezyjnych, mikrozgrzein i mikrospoin tworzących się między wierzchołkami nierówności (rys. 3.7).



Rys. 3.7. Schemat sczepiania obszarów styku trących powierzchni: 1, 2 – strefy sczepienia, 3 – strefy naprężeń wokół sczepień [214]

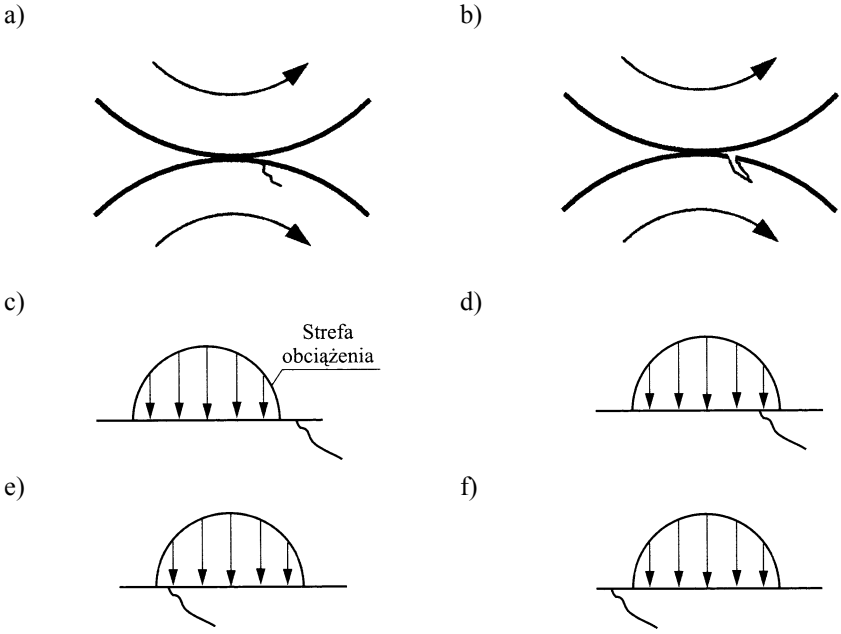
Proces zużywania adhezyjnego występuje przy małych prędkościach względnych i dużych naciskach jednostkowych. W przypadku niedostatecznego smarowania występuje tarcie mieszane, a gdy go brakuje – tarcie suche. Stopień izotropowości struktury powierzchni będzie wpływał na ilość i powierzchnie połączeń adhezyjnych.

Zużywanie przez utlenianie polega na adsorpcji tlenu w obszar tarcia i jego dyfuzji w odkształcone plastycznie i sprężyście mikroobjętości metalu oraz na usuwaniu powstałych w ten sposób warstewek tlenków na skutek tarcia. Jest to więc chemiczno-mechaniczna postać zużywania. Zużywanie przez utlenianie jest dominującym procesem, jeśli szybkość ciągłego procesu tworzenia się

warstw tlenków, a następnie ich usuwania, jest większa od innych procesów zużywania (np. ścierania).

Zużywanie wodorowe ma również postać chemiczno-mechaniczną i polega na adsorpcji wodoru na powierzchniach i jego dyfuzji w głąb materiału. Powoduje kruche pękanie w mikroobjętościach WW i jej niszczenie pod wpływem sił tarcia. Zużywanie wodorowe dominuje, gdy w czasie współpracy pary następuje intensywne wydzielanie wodoru, np. w przypadku pary: stal lub żeliwo – tworzywo polimerowe.

Zużywanie zmęczeniowe polega na niszczeniu warstwy wierzchniej elementów w wyniku występowania cyklicznych naprężeń kontaktowych (sprężysto-plastycznych). Wielocyklowe naprężenia kontaktowe w WW powodują zmęczenie materiału, a następnie miejscową utratę spójności, co prowadzi do powstawania i rozwoju mikropęknięć, a w konsekwencji pęknięć i ubytków materiału (rys. 3.8).



Rys. 3.8. Rozwój pęknięć zmęczeniowych: a) inicjacja i wzrost pęknięcia, b) propagacja pęknięcia, c) wypełnienie szczeliny olejem, d) zamknięcie wylotu szczeliny przez element współpracujący, e) otwieranie wylotu szczeliny, f) całkowite otwarcie szczeliny [214]

Proces zmęczenia może następować w całej objętości elementu lub tylko w jego warstwie wierzchniej. W pierwszym przypadku występuje objętościowe zużywanie zmęczeniowe, w drugim – powierzchniowe (stykowe).

Powierzchniowe zużywanie zmęczeniowe występuje przy współpracy ciał sprężystych o płaskiej i krzywoliniowej powierzchni tarcia lub o powierzch-

niach krzywoliniowych, stykających się punktowo lub liniowo, gdzie zachodzi tarcie toczne lub z poślizgiem [32, 151, 180, 295].

W literaturze brak jest wiążących informacji w kwestii wpływu stopnia izotropowości na zużywanie zmęczeniowe. Powierzchnie o małym stopniu izotropowości – wyraźnej kierunkowości – mogą mieć podobny wpływ na zużywanie jak karby przyspieszające procesy zmęczeniowe.

Struktura geometryczna powierzchni jest jednym z istotniejszych czynników, który w połączeniu z warunkami pracy (obciążeniem, względną prędkością, ośrodkiem smarującym) i własnościami materiałowymi ma wpływ na zużywanie tribologiczne. Spośród parametrów opisujących stan SGP na przebieg zużywania najistotniej wpływa chropowatość powierzchni oraz wzajemne ukierunkowanie nierówności trących powierzchni – kąt współpracy (przecięcia) między charakterystycznymi kierunkowościami powierzchni oraz stopień izotropowości, zwłaszcza w początkowym etapie pracy, w okresie tzw. docierania, gdy ślady obróbki na powierzchniach są jeszcze wyraźne [39, 93, 172, 175, 182, 183, 185, 238, 283, 346, 349].

Jak już wspomniano, w źródłach literaturowych można znaleźć liczne informacje, w których zużywanie uzależnia się od topografii powierzchni. Duża część tych prac, dotyczy docierania. W pracach [45, 77, 87, 94, 96, 102, 134, 168, 215, 244, 251, 289, 325, 339] przedstawiono analizę zmiany topografii powierzchni w trakcie docierania łożysk ślizgowych w warunkach smarowania. W pracach [289, 339] dodatkowo zawarto rozważania, czy w okresie docierania następuje plastyczne płynięcie nierówności czy tylko zużycie ścierne. Stwierdzono, że proces docierania w głównej mierze polega na ubytku materiału. W pracach [42, 104, 117, 234, 303, 318, 339] zaprezentowano badania wpływu topografii powierzchni w okresie docierania w warunkach ograniczonego smarowania lub braku smarowania.

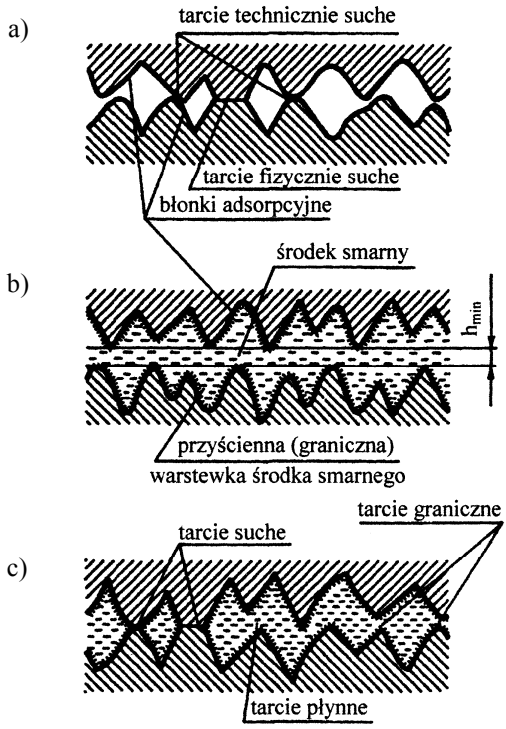
Można stwierdzić, że wysokość nierówności podczas eksploatacji zazwyczaj maleje niezależnie od chropowatości początkowej oraz że intensywność zużywania powierzchni dotartej jest niewielka.

Zdecydowanie najmniej jest prac, w których zużywanie uzależnia się od rozmieszczenia i ukierunkowania elementów ukształtowania SGP. Dodatkowo przedstawione w tych pracach spostrzeżenia trudno uogólniać, ponieważ obserwacje dotyczą określonych warunków, np. w pracy [339] stwierdzono, że w warunkach smarowania współpracujące powierzchnie wykazywały najmniejsze zużycie w kierunku ślizgania. Analizę relacji między stanem powierzchni a jej odpornością na zużywanie w warunkach tarcia technicznie suchego przedstawiono w pracy [48]. Stwierdzono, że powierzchnie o regularnym mikroprofilu wykazują nieznacznie większą odporność na zużycie w stosunku do powierzchni izotropowych. W pracy [133] przedstawiono związek między stopniem pokrycia powierzchni śladami nagniatania a zużyciem liniowym pary ciernej w warunkach tarcia mieszanego. W pracy [110] zaprezentowano natomiast analizę zmian ukształtowania SGP i stwierdzono, że najbardziej zmienia się krzywizna ukierunkowania struktury, a najmniej – głębokość ich dolin.

Przedstawiony wpływ kierunkowości struktury dotyczy ściśle określonych warunków współpracy, sformułowane wnioski odnoszą się do tych właśnie warunków i z tego powodu wykorzystanie rezultatów tych badań jest ograniczone.

3.2. OPORY RUCHU

Pod względem technicznym poza rodzajem ruchu istotny jest podział tarcia ze względu na brak lub występowanie środka smarnego między trącymi się powierzchniami, czyli na występujący styk (rys. 3.9).



Rys. 3.9. Schematy rodzajów tarcia ze względu na styk powierzchni: a) tarcie suche, b) tarcie płynne, c) tarcie mieszane [151]

Ruchowe tarcie suche ciał stałych to tarcie fizycznie i technicznie suche. W praktyce prawie zawsze występuje tarcie technicznie suche, które występuje przy współpracy niesmarowanych powierzchni elementów maszyn, lecz pokrytych tlenkami i warstewkami zaadsorbowanych gazów i par, a także w przypadku braku czynnika smarującego w normalnie smarowanych węzłach ciernych. Tarcie graniczne występuje, gdy powierzchnie trące są oddzielone w strefie styku warstwą substancji smarnej o najmniejszej możliwej grubości (ok. 0,5 μm). Warstwa ta jest tak cienka, że substancja smarna przejawia specyficzne cechy zbliżone do ciała stałego quasi-krystalicznego [151, 238, 256]. Opory tarcia

granicznego są funkcją nacisku normalnego i grubości warstwy. Podczas ruchu względnego warstewka substancji smarnej może być stosunkowo łatwo przerwana przez mikronierówności powierzchni. Po zniszczeniu tej warstewki występuje tarcie suche.

Tarcie płynne występuje wówczas, gdy w obszarach styku ciał stałych występuje całkowite rozdzielenie powierzchni trących warstwą czynnika smarującego, a tarcie zewnętrzne zostaje zastąpione tarciem wewnętrznym tego czynnika. Brak mechanicznego oddziaływania rozdzielonych od siebie nierówności współpracujących powierzchni sprawia, że proces zużywania elementów maszyn podczas tarcia płynnego przebiega z mniejszą intensywnością niż przy innych rodzajach tarcia. Jedynym mechanizmem niszczenia warstw wierzchnich jest tworzenie się związków chemicznych na ich powierzchniach (np. przez utlenianie) i ich ciągłe usuwanie. Opory ruchu zależą tylko od grubości warstwy substancji smarnej oraz jej lepkości, która zmienia się wraz z temperaturą i ciśnieniem.

Tarciem mieszanym nazywa się natomiast sumę zjawisk wszystkich lub co najmniej dwóch rodzajów tarcia. Występuje wtedy, gdy część obszarów tarcia styka się ze sobą bezpośrednio, a część jest rozdzielona warstwą graniczną lub warstwą cieczy smarującej. Ten rodzaj tarcia występuje powszechnie w węzłach ciernych maszyn, zwłaszcza przy małych prędkościach względnych, dużych naciskach oraz w stanach nieustalonych.

Kierunkowość struktury współpracujących powierzchni determinuje warunki rozprowadzania smaru, co ma bezpośrednie przełożenie na opory ruchu. Stopień izotropowości jest natomiast czynnikiem wpływającym na tworzenie się filmu olejowego. Czynniki te mają więc wpływ na rodzaj tarcia – tym samym na intensywność procesu zużywania.

Istnieje wiele teorii tarcia: od mechanicznych, przez molekularne, aż do energetycznych. W teoriach mechanicznych przyjmuje się, że główną przyczyną oporów ruchu ślizgowego jest mechaniczne oddziaływanie jednej powierzchni na drugą, czyli zaczepianie się nierówności pod wpływem obciążenia. W molekularnych teoriach tarcia przyjmuje się, że źródłem tarcia są wzajemne oddziaływania cząsteczek znajdujących się na najbardziej do siebie zbliżonych występach nierówności, przy czym najbardziej do siebie zbliżone cząsteczki obu współpracujących powierzchni odpychają się, a cząsteczki bardziej oddalone przyciągają się. Podczas przesuwania się powierzchni występuje ciągła zmiana położenia cząsteczek, jedne wychodzą ze strefy odpychania i wchodzą w strefę przyciągania, a inne odwrotnie. Ta ciągła zmiana charakteru powiązań molekularnych pomiędzy cząsteczkami trących się powierzchni powoduje rozpraszanie energii, a więc jest przyczyną oporów tarcia. W energetycznych teoriach tarcia przyjmuje się, że podczas procesu tarcia zachodzi przemiana energii kinetycznej lub pracy sił utrzymujących trące się ciała w ruchu na inne postacie energii. Zazwyczaj przyjmuje się, że wynikiem tej przemiany jest energia cieplna [263].

Niezależnie jaką teorię tarcia przyjmie się podczas rozpatrywania procesów tarcia stopień izotropowości współpracujących powierzchni niewątpliwie

wpływa na mechanizm tarcia. W teorii mechanicznej przyczynia się do ilości zaczepień nierówności, natomiast w molekularnej wpływa na ilość oddziaływań cząsteczek mikronierówności. W ujęciu energetycznym stopień izotropowości również wpływa na tarcie poprzez generowanie zmiennej ilości energii potrzebnej do wykonania pracy niezbędnej do utrzymania trących się ciał w ruchu.

Współcześnie w zagadnieniach tribologii najczęściej przyjmuje się, że proces tarcia przebiega łącznie według teorii mechanicznej i molekularnej. Teoria molekularno-mechaniczna [268] zakłada, że na rzeczywistych powierzchniach styku trących się ciał występują opory wywołane oddziaływaniem molekularnym oraz mechaniczne opory ruchu wywołane zahaczaniem się mikronierówności powierzchni i ich wzajemnym zagłębianiem się.

Przy uwzględnieniu teorii tarcia stwierdzić można, że na opory ruchu podczas tarcia ślizgowego wpływ mają następujące czynniki:

- warunki ruchu:
  - obciążenie,
  - względna prędkość poślizgu,
  - ciepło,
  - smarowanie i otoczenie;
- rodzaj tworzywa konstrukcyjnego;
- stan SGP.

W przypadku tarcia tocznego źródłem oporów są molekularno-mechaniczne oddziaływania w obszarze styku elementów przy ich przetaczaniu; są to [109, 291]:

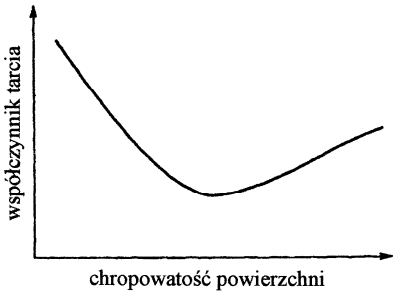
- makropoślizgi,
- mikropoślizgi,
- histereza odkształceń,
- tarcie w środku smarowym,
- adhezja.

Z uwagi na problematykę prezentowanej pracy przeanalizowano jedynie wpływ topografii powierzchni na charakterystyki tribologiczne związane z oporami tarcia przy styku konforemnym – rozłożonym. Wpływ ten jest istotny ze względu na to, że mikronierówności powierzchni, stykając się, tworzą rzeczywistą powierzchnię styku, a także przesuwając się po sobie, oddziałują mechanicznie. Dodatkowo w procesie tarcia SGP zmieniają się znacznie, a zmiany te zależą od warunków ruchu, własności trących się materiałów i środka smarnego. Ta złożona zależność powoduje trudności w formułowaniu jednoznacznych relacji ilościowych.

W literaturze przedmiotu można znaleźć liczne prace dotyczące wpływu stereometrii powierzchni na tarcie i smarowanie, przy czym zdecydowana większość tych prac dotyczy wyznaczania relacji między tarciem i smarowaniem powierzchni a parametrami chropowatości. Tylko nieliczne prace odnoszą się do kierunkowości SGP, a jej wpływ jest uwzględniany w analizie smarowania

powierzchni w aspekcie przepływu środka smarującego, natomiast stopień izotropowości ma niewątpliwie wpływ na współczynnik tarcia. W sposób istotny anizotropowy charakter powierzchni wpływa na warunki rozprowadzania smaru, natomiast charakter powierzchni izotropowych na ilość i powierzchnie styku.

Ogólnie można stwierdzić, że podczas tarcia kinetycznego zmniejszenie wysokości nierówności powierzchni początkowo powoduje zmniejszenie współczynnika tarcia, następnie osiąga minimum i w końcu rośnie (rys. 3.10) [19, 120, 151, 217].



Rys. 3.10. Zależność współczynnika tarcia ślizgowego od chropowatości powierzchni

Taka zależność jest spowodowana zmniejszeniem mechanicznego oraz wzrostem molekularnego oporu ruchu wraz ze zmniejszeniem się wysokości chropowatości. O dużych oporach tarcia bardzo gładkich powierzchni łatwo się przekonać przesuwając względem siebie płytki wzorcowe.

W literaturze omawia się szereg zależności tarcia i smarowania od parametrów SGP, a dotyczących konkretnych założeń czy warunków. Przykładowo w pracy [217] stwierdzono, że wysokość nierówności, określona parametrem Rpm, wywiera wpływ na współczynnik tarcia. Autorzy pracy [230] badali korelację pomiędzy parametrami topografii powierzchni a współczynnikiem tarcia blach stalowych w próbie zginania z rozciąganiem. Praca [177] również dotyczyła skorelowania tarcia układu tłokowego z chropowatością powierzchni cylindrów. Na podstawie badań przedstawionych w pracy [30] stwierdzono, że współczynnik tarcia pomiędzy gładkim elastomerem a powierzchnią chropowatą jest proporcjonalny do pochylenia jej szczytów. Badania przedstawione w pracy [348] wykazały, że zmniejszenie wysokości nierówności kół zębatych z 0,4 do 0,05 μm, pozwoliło na obniżenie temperatury powierzchni zęba i zmniejszenie tarcia o 30%. Prace [10, 80, 293] dotyczą współpracy tarciowej bardzo gładkich powierzchni o wysokości nierówności w skali nanometrów. Badania dotyczące tarcia oraz ich związku z chropowatością przy uwzględnieniu wymiaru fraktalnego można znaleźć w pracach [4, 31]. W pracy [76] przedstawiono analizę wpływu chropowatości na tarcie przy kontakcie wielopunktowym, a w [100] kształtu nierówności powierzchni i rozkładu wierzchołków. Prace [28, 148, 294] odnoszą się do badania tarcia dla różnych tworzyw konstrukcyjnych lub pokryć. Szczegółową analizę teoretycznych aspektów wpływu

topografii powierzchni na tarcie można znaleźć w pracach [1, 17, 18, 136, 139, 187, 194, 205, 206, 207, 337]. W większości przedstawionych publikacji siła tarcia jest proporcjonalna do wysokości nierówności lub pochylenia powierzchni.

Duża liczba tych prac dowodzi, że analiza topografii w aspekcie tribologicznym znajduje szerokie pole aplikacyjne. Jednak duża różnorodność warunków badawczych oraz przyjmowanych do opisu zmian parametrów SGP znacznie utrudnia formułowanie uogólnień.

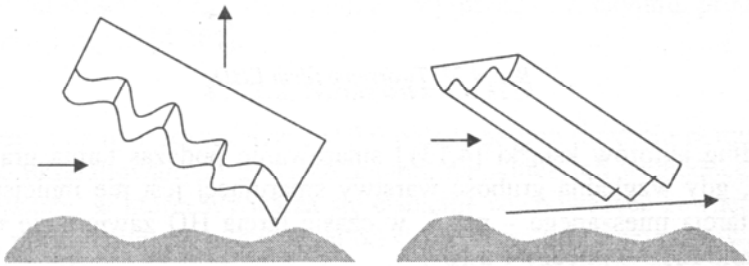
Jak już wcześniej zasygnalizowano, w literaturze jest również szereg publikacji, w których ukształtowanie SGP jest analizowane pod względem wpływu na smarowanie węzłów tarcia.

W pracy [41] przedstawiono analizę różnych wartości parametru λ (względnej grubości warstwy smarującej), który określa stosunek grubości filmu olejowego do równoważnej wysokości chropowatości. Stwierdzono, że wiele układów tribologicznych pracuje korzystnie przy małych wartościach λ. Według prac [309, 338] warunkiem tarcia płynnego jest, aby minimalna grubość filmu olejowego była większa od parametru pionowego chropowatości powierzchni Rp.

W literaturze brak jest ogólnych informacji określających wpływ stopnia izotropowości na warunki tworzenia się filmu olejowego.

Bardzo istotnym zagadnieniem związanym ze smarowaniem jest mechanizm smarowania hydrodynamicznego, a ściślej mówiąc – elastohydrodynamicznego. Smarowanie hydrodynamiczne polega na powstaniu pomiędzy odpowiednio ukształtowanymi powierzchniami, na skutek ich wzajemnego ruchu, warstwy cieczy, w której wytwarza się ciśnienie równoważące zewnętrzne obciążenie przy całkowitym oddzieleniu od siebie współpracujących powierzchni. Nierówności powierzchni powodują lokalne zakłócenia w przepływie środka smarującego i są ogniskami fali ciśnienia. Jeśli taka fala staje się odpowiednio silna, to wywołuje odkształcenie plastyczne i w efekcie bardziej zniekształci powierzchnię niż zmniejszy grubość warstwy środka smarującego. Wierzchołki zostaną wygładzone i rozpocznie się smarowanie elastohydrodynamiczne.

Topografia powierzchni wywiera dwa rodzaje wpływu na smarowanie hydrodynamiczne. Z jednej strony wierzchołki mogą wywoływać kontakt między powierzchniami, doprowadzając do przerwania filmu olejowego i istotna jest w tym przypadku ich wysokość. Z drugiej strony istotne jest usytuowanie kierunkowości powierzchni do kierunku ruchu (rys. 3.11).



Rys. 3.11. Wpływ usytuowania struktury ukierunkowanej w stosunku do kierunku ruchu na smarowanie hydrodynamiczne [238]

W pracach [208, 342] zauważono, że istnienie struktury skrzyżowanej na powierzchni łożyska ślizgowego może powodować poprawę rozkładu ciśnienia. Praca [237] dotyczy natomiast analizy wpływu anizotropii powierzchni na przepływ czynnika smarującego w warunkach częściowego smarowania hydrodynamicznego. Autorzy pracy [113] stwierdzili, że w warunkach smarowania elastohydrodynamicznego ukierunkowanie podłużne ułatwia przepływ oleju, a poprzeczne stawia opór. Stwierdzono ponadto, że wzrost chropowatości powoduje zmniejszenie minimalnej grubości warstwy smarującej. W pracy [173] przedstawiono analizę numeryczną wpływu topografii powierzchni na smarowanie hydrodynamiczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

Bardzo dużo prac dotyczy również wpływu chropowatości powierzchni na smarowanie węzła tarcia. Autorzy publikacji [22, 103, 127, 237, 279, 320] określali wpływ chropowatości na smarowanie hydrodynamiczne płynów newtonowskich oraz nienewtonowskich z dodatkami polimerów.

Na podstawie przedstawionych powyżej rozważań można stwierdzić, że znajomość relacji między parametrami opisującymi SGP a wymuszeniami w procesie eksploatowania umożliwia racjonalne sterowanie procesem użytkowania obiektu technicznego. Znając te relacje, a więc znając mechanizmy i prawidłowości występujące w procesie zużywania par trących, można sterować nie tylko procesem eksploatacyjnym, ale również poprzedzającym go procesem wytwórczym tak, aby zmiany w WW były jak najmniejsze, a tym samym żeby zwiększyć maksymalnie trwałość.

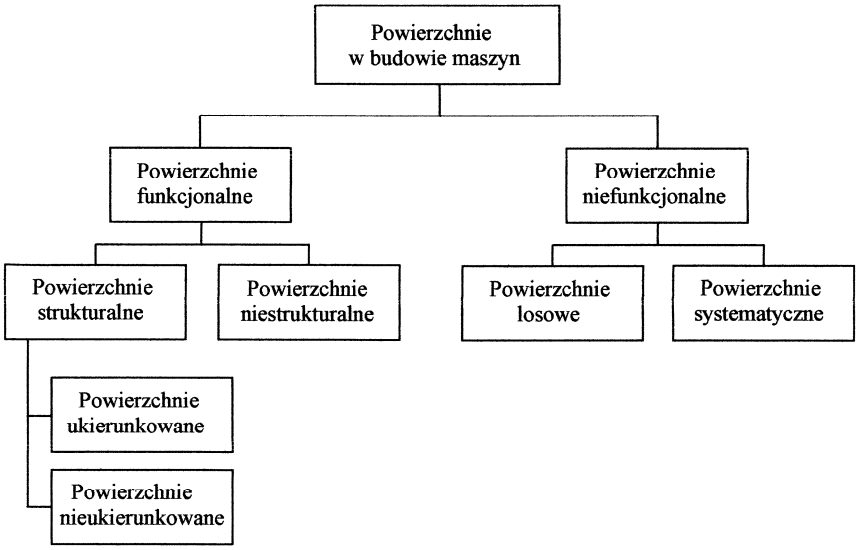
3.3. PROBLEMATYKA OCENY STANU STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI

Jednym z podstawowych celów metrologii SGP oprócz kontroli jest przewidywanie i optymalizacja cech użytkowych powierzchni, które są powiązane z jej ukształtowaniem.

W celu właściwego postępowania przy analizie topografii powierzchni w aspekcie jej właściwości użytkowych stosuje się ich klasyfikację w zależności od charakteryzujących je cech. Kolejnym krokiem w analizie powierzchni jest dokonanie wyboru odpowiednich parametrów, które umożliwią właściwe

wnioskowanie, czy określona struktura geometryczna może zapewnić danej powierzchni niezbędne cechy użytkowe.

W literaturze istnieje wiele podziałów powierzchni uwzględniających ich ukształtowanie i wynikające z niego charakterystyczne cechy. Klasyfikacje te służą ułatwieniu analizy powierzchni i ich modelowania. W pracy [352] przedstawiono ogólny podział powierzchni na potrzeby normalizacji, uwzględniający niezbędność ich analizy i funkcji, jakie spełniają (rys. 3.12).



Rys. 3.12. Klasyfikacja powierzchni pod kątem funkcjonalności [352]

Za funkcjonalne uważa się powierzchnie wytworzone w pewien określony sposób przez celową zmianę właściwości warstwy wierzchniej, aby osiągnąć założone efekty funkcjonalne. Powierzchnie niefunkcjonalne stanowią bezpośrednią konsekwencję procesu wytwarzania, a ich właściwości nie są przedmiotem dalszej analizy. Powierzchnie strukturalne mają określoną strukturę, która ma zapewnić osiągnięcie założonych efektów funkcjonalnych; w powierzchniach niestrukturalnych proces wytwarzania doprowadził do zmian warstwy wierzchniej, aby osiągnąć założone efekty funkcjonalne, ale bez uzyskania określonej struktury powierzchni. Według takiej klasyfikacji powierzchnia honowana jest funkcjonalna, strukturalna, ukierunkowana; arkusz blachy trawionej selektywnie i lekko walcowanej na zimno jest przykładem powierzchni funkcjonalnej, strukturalnej i nieukierunkowanej; z kolei powierzchnia bombardowana kulkami pod ciśnieniem jest funkcjonalna i niestrukturalna; powierzchnia odlewu z formy piaskowej – niefunkcjonalna i losowa, a powierzchnia szlifowana – niefunkcjonalna i systematyczna.

Ogólnie, jak już to wykazano, warstwa wierzchnia charakteryzuje się cechami zewnętrznymi i wewnętrznymi. Cechy zewnętrzne są głównie związane

ze strukturą geometryczną powierzchni, a wewnętrzne to właściwości chemiczne i fizyczne. Z uwagi na to, że współpracy elementów w parze ciernej towarzyszy interakcja ich powierzchni, SGP ma istotny wpływ na cechy użytkowe i charakterystyki tribologiczne [101, 141, 182, 192, 217, 239, 284, 353, 354]. Ważnym i ułatwiającym czynnikiem przy wyborze parametrów do analizy SGP jest rozpatrzenie uwarunkowań jej pracy i wynikających stąd funkcji celów. Wśród rozważanych uwarunkowań mogą wystąpić poniższe [327]:

- czy powierzchnia ma utrzymywać środek smarujący?
- czy powierzchnia będzie pracować w warunkach tarcia, a dominującym problemem współpracy będzie zużywanie?
- czy będzie występowało usuwanie materiału z powierzchni?
- czy będą występować naprężenia powierzchniowe?
- czy istnieje potrzeba stosowania powłok odpornych na działanie otoczenia?

Należy mieć świadomość, że wykorzystanie wszystkich parametrów do oceny SGP w aspekcie jej cech użytkowych nie jest realne. Z drugiej strony, dużym uproszczeniem jest próba oceny SGP za pomocą tylko jednego parametru, co niestety jeszcze często można spotkać w praktyce przemysłowej.

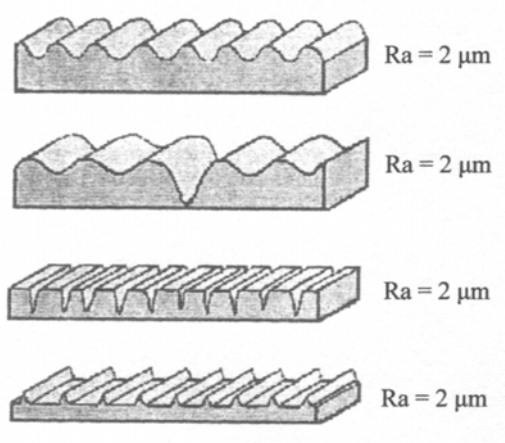
Rozwój wspomaganej komputerowo precyzyjnej aparatury pomiarowej i cyfrowej analizy powierzchni sprzyja tworzeniu wielu parametrów wykorzystywanych w opisie SGP. W pracy [218] przedstawiono 39 parametrów chropowatości, natomiast normy ISO zawierają 57 takich parametrów [54]. Różne wskaźniki chropowatości zawierają także prace [66, 118, 235, 333, 334].

Obecnie istnieje tendencja do ujednolicania i zmniejszania liczby uprzywilejowanych parametrów w normach krajowych.

Autorzy pracy [125] przestrzegają przed używaniem nadmiernej liczby parametrów. Wprowadzanie nowych parametrów powinno być przemyślane i poprzedzone dokładnymi badaniami. Autorzy proponują też podział parametrów na dwie grupy: przemysłowe oraz naukowe. Podział taki może jednak być trudny do realizacji i wzbudza pewne wątpliwości.

W celu ułatwienia wyboru i ograniczenia liczby parametrów opisujących SGP zaproponowano listę podstawowych parametrów, tzw. listę Birmingham 14, zawierającą zbiór 14 parametrów [288]. Zbiór ten tworzą parametry: amplitudowe, przestrzenne, hybrydowe oraz funkcjonalne.

Utworzenie uniwersalnego zestawu parametrów, jednakowo przydatnego do powierzchni o zróżnicowanym przeznaczeniu funkcjonalnym, nie jest w praktyce możliwe. Nawet przy podobnych wartościach podstawowych parametrów amplitudowych pozostałe parametry mogą znacząco różnić się między sobą. Ocena powierzchni może być wówczas niejednoznaczna, gdyż mogą mieć one zbliżoną lub tę samą wartość parametru chropowatości i różne własności użytkowe. Na rysunku 3.13 przedstawiono przykładowe porównanie parametru chropowatości Ra dla różnych rodzajów profili.



Rys. 3.13. Porównanie profili o jednakowej wartości parametru Ra [329]

Przedstawione profile pomimo tej samej wartości parametru chropowatości Ra będą charakteryzować się różnymi cechami eksploatacyjnymi.

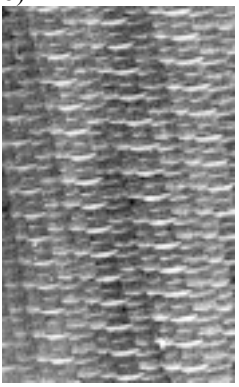
Dla każdej analizowanej powierzchni należy oddzielnie zdecydować, które cechy SGP są ważne pod względem własności użytkowych i które parametry chropowatości dają najwłaściwszą informację. Nie istnieją normy stwierdzające, w jakich przypadkach należy stosować poszczególne parametry, w literaturze można znaleźć jedynie odpowiednie rekomendacje przy doborze parametrów do oceny cech eksploatacyjnych.

Porównanie wartości parametrów chropowatości dla różnych powierzchni determinujących odmienne cechy eksploatacyjne przedstawiono na rysunku 3.14.

a)

Ra = 1,15 μm
Rz = 5,31 μm
Rt = 5,8 μm
Rp = 3,47 μm
Rk = 3,02 μm
Rpk = 1,45 μm
Rvk = 0,51 μm

b)



Ra = 1,21 μm
Rz = 5,73 μm
Rt = 6,31 μm
Rp = 3,94 μm
Rk = 3,24 μm
Rpk = 1,21 μm
Rvk = 3,81 μm

Rys. 3.14. Widok oraz parametry opisujące SGP elementów obrobionych: a) toczeniem – dla v_C = 18,5 m·s^{-1} i f = 0,17 mm·obr^{-1} (aluminium), b) frezo-toczeniem – dla v_C = 2,1 m·s^{-1} i f = 0,75 mm·obr^{-1} (stal)

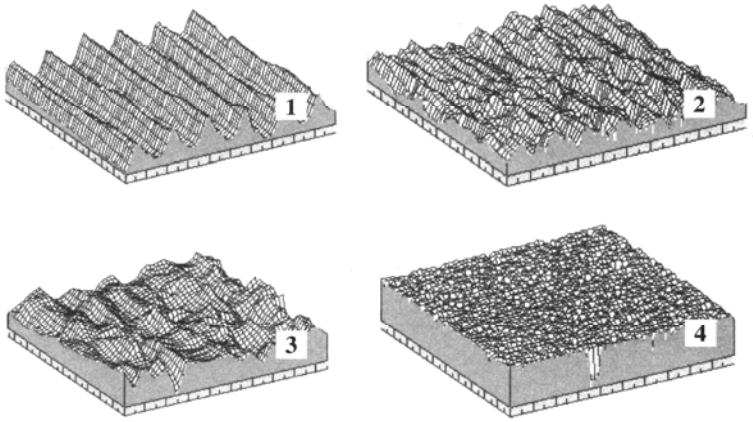
Z przedstawionego porównania wynika, że parametry amplitudowe, które są powszechnie stosowane do opisu charakterystyk tribologicznych i które były pierwszymi parametrami branymi pod uwagę przy ocenie powierzchni, nie do końca precyzyjnie informują o możliwym zachowaniu powierzchni w parze kinematycznej. Dopiero analiza parametrów krzywej nośności różnicuje zachowania w skojarzeniu ciernym. Powierzchnia o znacznie większej wartości Rvk będzie powierzchnią wykazującą większe zdolności do utrzymywania oleju i jednocześnie z racji mniejszej wartości Rpk, choć już nie tak wyraźnie, będzie bardziej odporna na ścieranie w początkowym okresie współpracy.

Dobór różnych parametrów chropowatości do wyznaczania charakterystyk tribologicznych przeprowadzany jest na podstawie badań naukowych, statystycznych powiązań między nimi, dostępności aparatury. Jak już wykazano, dobrane parametry opisujące strukturę powierzchni w aspekcie jej cech użytkowych mogą nie zawsze jednoznacznie ją sklasyfikować. Z tych powodów dobór ten będzie zawsze obarczony mniejszym lub większym subiektywizmem. Dlatego zastosowanie opisu SGP opartego na jej funkcjach matematycznych, a w szczególności na powierzchniowej funkcji autokorelacji lub widmowej gęstości mocy, wydaje się postępowaniem nieobarczonym błędem subiektywnego modelowego doboru parametrów.

Potwierdzeniem tego może być również analiza porównawcza SGP przedstawiona w pracy [227]. Poddano jej powierzchnie otrzymane w wyniku:

- toczenia z dużą prędkością skrawania,
- szlifowania wzdłużnego,
- szlifowania wgłębnego,
- dogładzania oscylacyjnego.

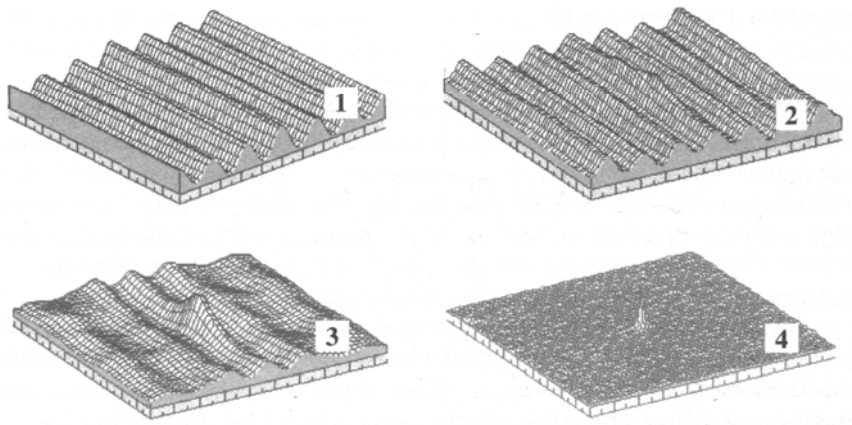
Powierzchnie uzyskane po wymienionych obróbkach przedstawiono na rysunku 3.15.



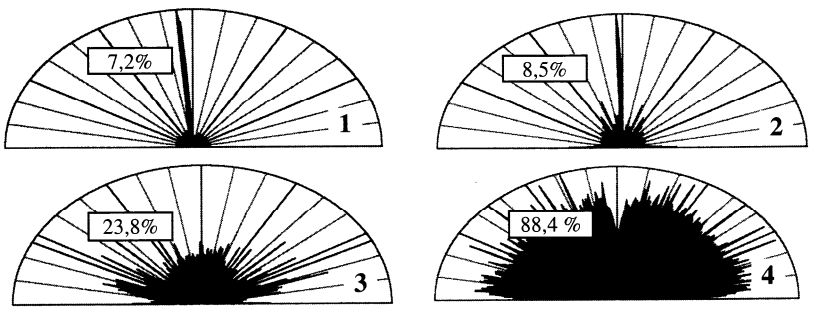
Rys. 3.15. Powierzchnie uzyskane: 1 – toczeniem, 2 – szlifowaniem wzdłużnym, 3 – szlifowaniem wgłębnym, 4 – dogładzaniem oscylacyjnym [227]

Powierzchnia po toczeniu i szlifowaniu wzdłużnym jest powierzchnią wyraźnie anizotropową, powierzchnia po dogładzaniu oscylacyjnym jest izotropowa, natomiast powierzchnia po szlifowaniu wgłębnym jest powierzchnią z przewagą anizotropowości.

Na rysunku 3.16 przedstawiono wykresy funkcji autokorelacji tych powierzchni, a na rysunku 3.17 – stopień izotropowości w postaci róży morfologicznej.



Rys. 3.16. Wykres funkcji autokorelacji powierzchni (oznaczenie powierzchni jak na rys. 3.15) [227]



Rys. 3.17. Stopień izotropowości powierzchni (oznaczenie powierzchni jak na rys. 3.15) [227]

Na przedstawionych rysunkach zauważyć można zmianę wykresu funkcji autokorelacji i precyzyjne określenie stopnia izotropowości w zależności od analizowanej topografii powierzchni.

Zastosowanie funkcji przestrzenno-częstotliwościowych jest coraz powszechniejsze. Analiza częstotliwościowa jest źródłem informacji o procesie wytwarzania. W pracach [24, 130, 171, 219, 260, 323] przedstawiono przykłady monitorowania procesu technologicznego z wykorzystaniem funkcji częstotli-

wościowych i wnioskowanie na tej podstawie o różnych czynnikach procesu, np. występujących sił skrawania i ich składowych, natomiast w pracach [195, 258, 335] funkcje te wykorzystano jako nośnik informacji o stanie ostrza narzędzia skrawającego i obrabiarce.

W przedstawionej pracy proponuje się rozszerzyć zastosowanie funkcji częstotliwościowych SGP do oceny zmian WW w aspekcie ich cech użytkowych. Podobne ujęcie zaprezentowano w pracy [227], w której sugeruje się, że kolejnym krokiem po metrologicznej analizie powierzchni powinna być porównawcza analiza funkcjonalnych cech użytkowych ich struktur geometrycznych. Analiza częstotliwościowa umożliwia dodatkowo ocenę struktury geometrycznej powierzchni, niezależnie od charakteru sposobu obróbki.

Po raz pierwszy metody analizy sygnałów losowych do analizy profili powierzchni zastosował Peklenik [240]. W pracy zastosował funkcje autokorelacji i widmowej gęstości mocy powiązane przekształceniem Fouriera. Transformata Fouriera jest stosowana również w komputerowym generowaniu powierzchni [275, 277]. W publikacji [276] analizowano nawet możliwość modelowania powierzchni przy ograniczonej liczbie współczynników Fouriera.

Charakterystyka powierzchni oparta na parametrach chropowatości jest dodatkowo utrudniona przez zmienność wartości parametrów w różnych miejscach powierzchni, wynikającą z samego procesu obróbki. Dla każdego parametru zakres rozrzutu jego wartości jest inny, z reguły większy dla parametrów wzdłużnych niż dla wysokościowych i w praktyce możliwy rozrzut może sięgać nawet kilkudziesięciu procent [286]. W pracy [305] przedstawiono analizę rozrzutu wartości 14 parametrów w różnych miejscach powierzchni przy 10-krotnym powtarzaniu. Stwierdzono 15% zmiany wartości parametrów na próbkach wzorcowych i nawet do 50% na powierzchniach obrobionych. Przy okazji stwierdzono ponadto, że zmniejszanie odcinka elementarnego pomiaru wpływa na zmniejszenie powtarzalności parametrów chropowatości. W pracy [169] omówiono natomiast wpływ lokalnych nieregularności na powtarzalność pomiarów parametrów amplitudowych oraz poziomych. Parametry poziome wykazują większą zmienność wartości niż parametry amplitudowe. Z kolei praca [63] zawiera analizę zmiany wartości parametrów spowodowaną kierunkowością struktury. Zaobserwowano, że liczba i kształt wgłębień i rowków powodują znaczną zmianę wartości mierzonych parametrów. Stwierdzono również, że pomiar w kierunku prostopadłym do ukierunkowania SGP zapewnia większą powtarzalność.

Obecnie przy ocenie własności użytkowych zaleca się zawsze posługiwanie zbiorem odpowiednio dobranych parametrów [227, 327], co często jest skomplikowanym problemem. W pracy [327] sugeruje się nawet, żeby oprócz dobranych do oceny parametrów podawać również sposób obróbki.

Na podstawie powyższych analiz można uznać, że uwzględnienie kierunkowości struktury powierzchni oraz jej izotropowości stanowi czynnik przyczyniający się do lepszej oceny analizowanej powierzchni, zwłaszcza w aspekcie jej potencjalnych cech użytkowych.

4. PODSUMOWANIE STUDIUM LITERATUROWEGO

Przeprowadzone studium literaturowe zawiera uporządkowaną analizę informacji o relacjach między stanem warstwy wierzchniej a cechami użytkowymi par kinematycznych. Przedstawiono w nim kompleksowe ujęcie warstwy wierzchniej: od jej opisu, określenia wielkości charakteryzujących stan WW do opisania zmian zachodzących w poszczególnych fazach jej istnienia. Scharakteryzowano również cechy eksploatacyjne ciernych par kinematycznych. Zwrócono szczególną uwagę na zagadnienie związane ze sposobem doboru wielkości opisujących SGP do właściwego wnioskowania o cechach eksploatacyjnych.

4.1. WNIOSKI Z ANALIZY LITERATURY, HIPOTEZA NAUKOWA

Na podstawie analizy dostępnej literatury stwierdzono, że od cech warstwy wierzchniej elementów tworzących pary kinematyczne zależą skutki procesu zużywania, a w konsekwencji trwałość całego obiektu technicznego. Warstwa wierzchnia i jej stan są tak bardzo istotne dla trwałości obiektu technicznego i jego prawidłowego funkcjonowania, ponieważ większość uszkodzeń (90%) [356] zachodzi właśnie w tej strefie elementu.

Analiza zbioru informacji wykazała, że spośród wielkości charakteryzujących WW do opisu jej cech i zachodzących w niej zmian najczęściej przyjmuje się parametry opisujące strukturę geometryczną powierzchni, a wśród nich różne parametry chropowatości. Są one niewątpliwie istotne i to zarówno dla styku konforemnego, jak i niekonforemnego współpracujących powierzchni, ale nie w pełni charakteryzują WW i stąd nie ujmują wszystkich zmian zachodzących w obszarze styku. Analiza informacji literaturowych wykazała, że dla procesu zużywania istotnym elementem SGP jest jej kierunkowość, szczególnie dla styku konforemnego.

Najczęściej wpływ kierunkowości analizowany jest w aspekcie smarowania węzła tarcia. Określany jest wpływ kierunkowości SGP współpracujących elementów na powstawanie i utrzymywanie filmu smarnego. Rzadziej kierunkowość przyjmuje się do wyznaczenia relacji między nią jako charakterystyczną cechą SGP a odpornością na zużycie.

Potwierdzeniem istotności kierunkowości jest również uwzględnienie jej niekiedy przy pomiarach chropowatości, której parametry wykorzystuje się w opisie procesu zużywania. W pomiarach tych uwzględnia się kierunek pomiaru ze względu na kierunkowość [85, 328, 329]. W pracach [227, 278] zwrócono również uwagę na kierunkowość SGP w aspekcie wytrzymałości zmęczeniowej.

W źródłach literaturowych najmniej jest informacji o relacji między transformacją WW a kierunkowością struktury współpracujących powierzchni. Analizując proces zużywania elementów par kinematycznych z konforemnym ich stykiem, stwierdzono, że istotna w tym zakresie jest kinematyka względnych ruchów, jakie wykonują. Z tego powodu istotnym elementem SGP jest niewąt-

pliwie jej kierunkowość i uwzględnianie jej przy opisie transformacji WW wydaje się w pełni uzasadnione.

W literaturze omawia się wiele sposobów określania kierunkowości. Najbardziej zaawansowany jest sposób oparty na funkcjach matematycznych opisujących częstotliwościowo SGP – powierzchniowej funkcji autokorelacji lub widmowej gęstości mocy. Wówczas rozmieszczenie i ukształtowanie śladów obróbki lub zużywania jest określane stopniem izotropowości lub jej odwrotnością – stopniem anizotropowości. W prezentowanej pracy do opisu kierunkowości struktury powierzchni przyjęto stopień izotropowości SGP, wyznaczony z powierzchniowej funkcji autokorelacji jako jeden z bardziej obiektywnych sposobów scharakteryzowania SGP.

Przy pomiarach topografii powierzchni oprócz kontroli jej wykonania istotnym celem jest również przewidywanie i optymalizacja właściwości funkcjonalnych powierzchni. Środkiem do uzyskania optymalnych cech eksploatacyjnych jest opracowanie odpowiedniego procesu technologicznego. Dlatego ważne jest dobranie odpowiednich parametrów, które umożliwią właściwe wnioskowanie, czy określona SGP może zapewnić danej powierzchni niezbędne cechy eksploatacyjne.

Przy ocenie chropowatości powierzchni pewnym problemem jest duża liczba różnych parametrów. Utworzenie uniwersalnego zestawu parametrów, jednakowo przydatnego do oceny powierzchni o zróżnicowanym przeznaczeniu funkcjonalnym, nie jest w praktyce możliwe. Nawet przy podobnych wartościach podstawowych parametrów amplitudowych pozostałe parametry mogą się znacząco różnić. Ocena powierzchni może być wówczas niejednoznaczna, ponieważ mogą mieć one zbliżoną lub tę samą wartość wysokości chropowatości, a różne własności użytkowe. Analiza związków korelacyjnych pomiędzy parametrami chropowatości SGP a cechami eksploatacyjnymi opiera się jedynie na opracowaniach statystycznych. Nie istnieją normy stwierdzające, w jakich przypadkach należy stosować poszczególne parametry, w literaturze można znaleźć jedynie odpowiednie rekomendacje, które parametry chropowatości dają najwłaściwszą informację przy ocenie cech eksploatacyjnych.

Parametry chropowatości są niewątpliwie istotne przy interpretowaniu charakterystyk tribologicznych, jednak porównywanie i uogólnianie stwierdzeń jest już znacznie utrudnione. Ten mankament badań tribologicznych sygnalizowany jest w szeregu publikacji [33, 245, 257, 264, 280, 314, 315]. Na podstawie przeprowadzonych w studium literaturowym analiz stwierdzono, że głównymi przyczynami takiego stanu są:

- brak jednolitej teorii tarcia i uogólnionego opisu zjawisk tribologicznych,
- duża różnorodność stanowisk i metod badawczych,
- niepełne informacje dotyczące warunków i przebiegu badań doświadczalnych,
- ograniczona wiedza dotycząca czynników wpływających na wyniki eksperymentów i ich rozrzut.

Wymienione czynniki powodują, że pewne obserwacje nie potwierdzają się w różnych warunkach – w niektórych są nawet sprzeczne. Stwierdzono na przykład, że po zakończeniu procesu docierania dalsze zmiany chropowatości zależą od wartości początkowej wysokości nierówności [318]. Jest to w sprzeczności z większością obserwacji, zgodnie z którymi po zakończeniu procesu docierania i pracy w II okresie krzywej Lorenza aktualna chropowatość nie zależy już od wartości początkowej. Podobną sprzeczność wykazano w pracy [174], w której stwierdzono, że przy dużych naciskach czystość stali ma niewielkie znaczenie dla zużywania przez pitting, podczas gdy w przeciętnych warunkach jest to czynnik bardzo istotny.

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

1. Rozszerzanie wiedzy o mechanizmach elementarnych występujących w procesie zużywania, w tym zwłaszcza o transformacji WW.
2. Określenie relacji między sposobem i parametrami obróbki a cechami użytkowymi WW z uwzględnieniem w nich wpływu kierunkowości i izotropowości SGP.
3. Opracowanie ujednoliconych metod badawczych umożliwiających porównanie uzyskiwanych wyników i uogólnianie dokonanych spostrzeżeń.

Podjęta w pracy problematyka jest spójna z aktualnymi tendencjami w badaniach tribologicznych [35, 68, 118, 151].

Zidentyfikowano zagadnienia dotyczące kierunkowości struktury jako obszarów wiedzy, które wymagają uzupełnienia. W zakresie relacji między stanem WW a cechami użytkowymi przyczyni się do tego zweryfikowanie poniższej hipotezy naukowej:

Kierunkowość struktury powierzchni wpływa na mechanizm transformacji WW. Uwzględnienie stopnia izotropowości w analizie zachodzących zmian w WW przyczynia się do zwiększenia szczegółowości opisu tego mechanizmu.

Zweryfikowanie tak sformułowanej hipotezy naukowej wymagało przeprowadzenia cyklu badań eksperymentalnych oraz badań analitycznych przedstawionych w kolejnych częściach pracy.

4.2. CEL I ZAKRES BADAŃ

Zasadniczym celem poznawczym badań była weryfikacja sformułowanej hipotezy naukowej – a więc znalezienie relacji między rozkładem ukształtowania struktury geometrycznej powierzchni z uwzględnieniem stopnia izotropowości a intensywnością procesu zużywania. Opracowano je na podstawie wyznaczonego zbioru czynników eksploatacyjnych istotnych dla procesu zużywania. Dzięki temu opis zmian zachodzących w WW, zarówno w fazie wytwarzania (TWW), jak i eksploatowania (EWW), będzie dokładniejszy.

Na podstawie studium literaturowego, a także własnych doświadczeń w tym zakresie stwierdzono, że wyraźnie większy wpływ na proces zużywania ma kierunkowość struktury powierzchni elementów ciernych par kinematycznych o styku konforemnym, dlatego też badania przeprowadzono dla tego rodzaju styku.

Wspomniany cel zostanie osiągnięty, gdy zostaną opracowane relacje między czynnikami badanymi a zbiorem czynników stanowiących wymuszenia. Do zbioru wymuszeń na podstawie analizy literatury zaliczono czynniki eksploatacyjne (obciążenie, prędkość tarcia) oraz czynniki technologiczne związane z rozmieszczeniem i ukierunkowaniem śladów obróbki (stopień izotropowości, kąt współpracy wynikający z kierunkowości trących powierzchni).

Do zrealizowania założonego celu pracę podzielono na sześć części. Cztery pierwsze umożliwiły wybór i weryfikację problemu badawczego oraz sformułowanie hipotezy naukowej na podstawie oceny stanu wiedzy z zakresu transformacji warstwy wierzchniej oraz wymuszeń technologicznych i eksploatacyjnych, które na tę transformację wpływają.

Hipotezę zweryfikowano na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych przedstawionych w części piątej. Opisano w niej obiekt badań i przyjętą metodykę badawczą. Wyniki badań własnych wykorzystano do weryfikacji hipotezy naukowej i opracowania zależności matematycznych. Opracowano je dwuetapowo. W pierwszym etapie wyznaczono zależności między czynnikami eksploatacyjnymi a zmieniającym się podczas badań stopniem izotropowości SGP. W drugim – określony w badaniach stopień izotropowości został zaliczony do czynników stanowiących zbiór wielkości wejściowych. Wyznaczone w taki sposób zależności matematyczne określiły relacje między czynnikami wejściowymi a wielkościami określającymi intensywność procesu zużywania.

W części szóstej, stanowiącej podsumowanie, przedstawiono wnioski podzielone na trzy grupy: poznawcze, utylitarne i określające kierunki dalszych badań.

Do zakresu badań zaliczono również zweryfikowanie osiągnięcia założonego celu poprzez sprawdzenie, czy kryterium osiągnięcia celu zostało spełnione. Kryterium tym jest poziom adekwatności utworzonych zależności matematycznych do uzyskanych wyników. Przy zadowalającym poziomie zależności matematyczne dobrze scharakteryzują zmiany analizowanych czynników zarejestrowane w badaniach doświadczalnych, co świadczyć będzie o dokładności opisu.

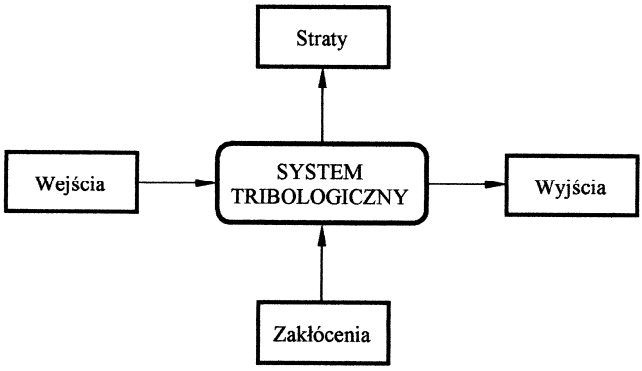
5. KIERUNKOWOŚĆ STRUKTURY POWIERZCHNI W BADANIACH TRIBOLOGICZNYCH

W rozdziale przedstawiono rezultaty badań eksperymentalnych i analitycznych. Uzyskane wyniki powinny przyczynić się do osiągnięcia założonego celu.

5.1. METODYKA BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

Istotą badań tribologicznych jest obserwacja zjawisk i mechanizmów towarzyszących procesowi tarcia, decydujących o jego przebiegu, a w konsekwencji o jego podstawowych skutkach. Dokonane spostrzeżenia weryfikują zdobytą wiedzę i ewentualnie ją poszerzają, umożliwiają także formułowanie wniosków. Rezultaty eksperymentów pozwalają osiągnąć podstawowy cel badań tribologicznych, jakim jest uzyskanie możliwości sterowania procesami tribologicznymi. Po to, aby wynikiem procesu badawczego były prawidłowe i miarodajne rezultaty, należy przyjąć odpowiedni model badań tribologicznych oraz program badawczy. W badaniach tribologicznych spośród metod badawczych szerokie zastosowanie ma eksperyment, który charakteryzuje się możliwością aktywnego oddziaływania na obiekt badań. W tribologicznych eksperymentalnych badaniach modelowych oprócz modelowania obiektu stosuje się również modelowanie sytuacji eksperymentalnej.

Ogólny schemat systemu tribologicznego – węzła tarcia, w którym zachodzą procesy tribologiczne, przedstawiono na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Ogólny model systemu tribologicznego [291]

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

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

Odpowiedzią systemu na wymuszenia są zmiany czynników wyjściowych, które mogą być również kontrolowane i niekontrolowane. Wyjścia kontrolowa-

ne to odpowiedź systemu tribologicznego na wielkości wejściowe: zadawane i stałe. Wyjścia niekontrolowane to zmiany stochastyczne spowodowane czynnikami, których wpływu na badane wielkości z reguły się nie określa.

W metodologii przyjmuje się, że plany badań doświadczalnych charakteryzują trzy wielkości [248]:

- realizowalność – możliwość zrealizowania planu w odniesieniu do rzeczywistego obiektu badań przy zastosowaniu określonych metod i środków pomiarowych,
- informatywność – liczba informacji, które uzyskuje się na podstawie badań i analizy ich wyników,
- efektywność – nakłady finansowe niezbędne do realizacji planu zapewniającego zakładaną efektywność.

Spośród dostępnych planów należy wybrać taki, który zapewni możliwie najszersze wykorzystanie wyników badań tribologicznych (informatywność) przy minimalnych nakładach (efektywność), umożliwiający ich zrealizowanie przy określonych założeniach (realizowalność). Przyjęty program badawczy powinien charakteryzować się również powtarzalnością i odtwarzalnością, co pozwoli na standaryzację i uogólnienie zaobserwowanych zjawisk i mechanizmów tribologicznych. Złożoność zjawisk tarcia znacznie utrudnia przyjęcie odpowiedniego programu i właściwego modelowania badań tribologicznych, dlatego częstym działaniem jest wstępna weryfikacja poprawności przyjętej metodyki – badania wstępne [68, 158, 159, 296, 313, 315]. Możliwe jest wówczas ewentualne skorygowanie metodyki przed czaso- i pracochłonnymi badaniami zasadniczymi.

W niektórych krajach podjęto nawet działania zmierzające do zwiększenia powtarzalności i porównywalności eksperymentalnych badań tribologicznych. Efektem tych działań były próby normalizacji metod stosowanych urządzeń badawczych [179, 296, 297, 314].

Ważnym etapem po przeprowadzeniu eksperymentu jest wyznaczenie równań regresji opisujących relacje między zaobserwowanymi zmianami modelu badawczego a obiektem rzeczywistym. Opracowane zależności matematyczne determinują możliwość wykorzystania wyników badań modelu, określają również granice stosowalności uzyskanych wyników badań.

Ogólnie równania regresji jako funkcja odpowiedzi charakteryzująca relacje między rezultatami eksperymentu a parametrami zmiennych niezależnych mają postać:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^{k} a_i x_i \tag{5.1}$$

gdzie:

y – funkcja odpowiedzi – modelowa,
x_i – czynniki badane,
a_0, a_i – współczynniki regresji.

Z uwagi na złożoność zjawisk tribologicznych (mechaniczno-fizyczno-chemicznych) w celu uzyskania jak największej adekwatności aproksymacji – relacji między zaobserwowanymi zmianami modelu badawczego a obiektem rzeczywistym – stosuje się bardziej zaawansowany aparat matematyczny i funkcje odpowiedzi przyjmują np. postać wielomianów, funkcji wykładniczych, logarytmicznych itp.

5.2. PROGRAM I METODYKA BADAŃ

5.2.1. Przedmiot i obiekt badań

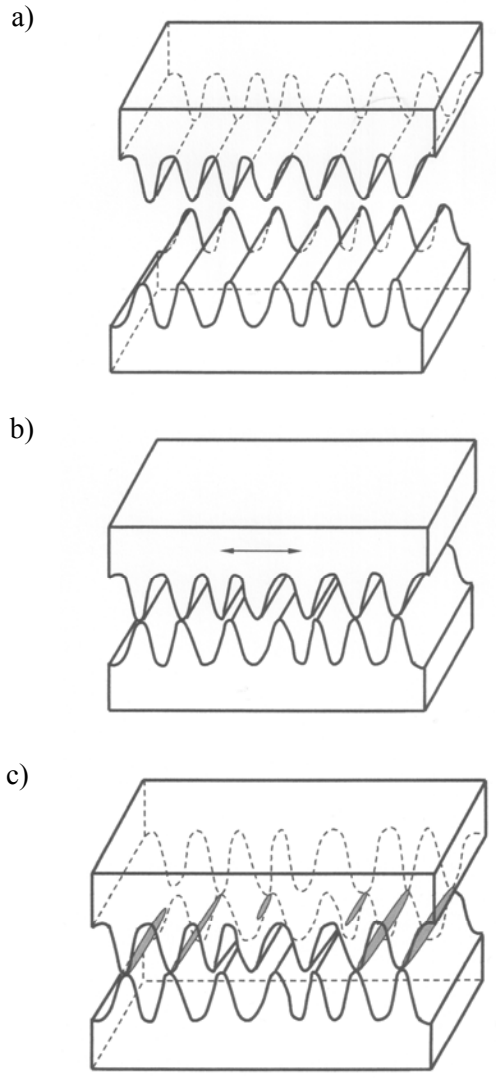
Z uwagi na zakres tematyczny pracy przedmiotem badań są procesy zachodzące w parach kinematycznych ze stykiem konforemnym wywołujące zmiany w warstwie wierzchniej jej elementów. Przykładem par ciernych o takim styku są: łożyska ślizgowe, prowadnice ślizgowe, węzły tarcia robotów przemysłowych, zazębienie przekładni ślimakowych itp. Struktura geometryczna powierzchni elementów tworzących takie pary charakteryzuje się między innymi kierunkowością, którą można opisać stopniem izotropowości. W czasie współpracy przedmiotowych elementów, szczególnie w początkowym okresie, w obszarze ich styku – z uwagi na charakterystyczne ukształtowanie struktury (ślady obróbki) – można określić względny kąt przecięcia tych śladów na powierzchniach elementów. Poza stopniem izotropowości struktury była to kolejna zmienna niezależna w czasie badań związana z ukształtowaniem SGP, od której uzależniono proces zużywania.

Schemat styku współpracujących powierzchni z uwzględnieniem ukierunkowania struktury – śladów obróbki – przedstawiono na rysunku 5.2.

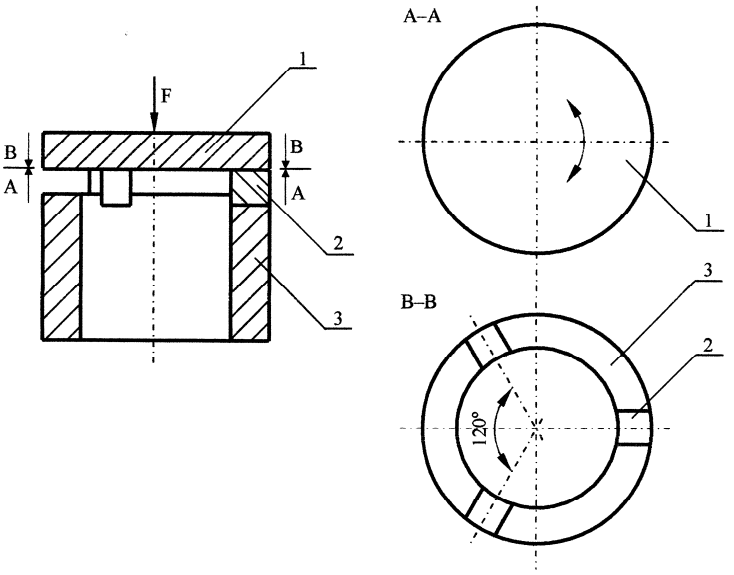
W celu zrealizowania przyjętych założeń za obiekt badań doświadczalnych przyjęto parę kinematyczną, składającą się z próbki w kształcie sześcianu oraz przeciwpróbki wykonanej w postaci płaskiej płytki pierścieniowej. Na powierzchniach próbki i przeciwpróbki w ściśle określony sposób wykonano ślady obróbki, tak aby w wyniku kojarzenia tych elementów uzyskać zdefiniowany kąt przecięcia ukierunkowania SGP, od którego m.in. zależy stopień izotropowości. Na rysunku 5.3 przedstawiono ogólną zasadę współpracy pary kinematycznej.

Próbki są mocowane nieruchomo w trzech rowkach, wykonanych na powierzchni czołowej tulei ustalającej próbki. Rowki te są wykonane co 120°, przez co w czasie badań uzyskuje się trójpowierzchniowy, równomiernie rozłożony docisk współpracujących elementów, który realizowany jest poprzez napięcie sprężyny. Ruch względny, oscylacyjny wykonuje przeciwpróbka.

Poprzez wykonanie na powierzchni przeciwpróbki i próbek ściśle określonych śladów po obróbce i skojarzenie tych elementów uzyskać można zdefiniowane wynikowe skojarzenie kątowe między charakterystyczną kierunkowością SGP.



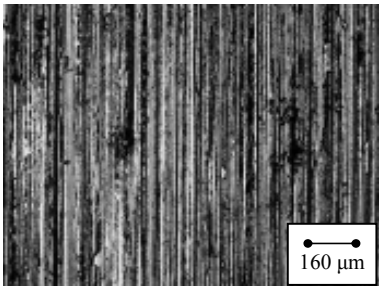
Rys. 5.2. Schemat styku współpracujących powierzchni z uwzględnieniem wzajemnego usytuowania śladów obróbki (kierunkowości struktury): a) elementy przed stykiem, b) współpracujące elementy przy $\alpha = 0^{\circ}$, c) schemat rzeczywistego styku w czasie współpracy



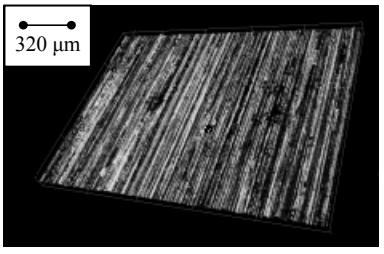
Rys. 5.3. Schemat współpracy próbek z przeciwpróbką: 1 – przeciwpróbka, 2 – próbki, 3 – tuleja ustalająca próbki

Na rysunku 5.4 przedstawiono obrazy struktury powierzchni elementów przyjętych do badań tribologicznych, wykonanych konfokalnym laserowym mikroskopem skaningowym LEXT OLS3100 firmy OLYMPUS.

a)

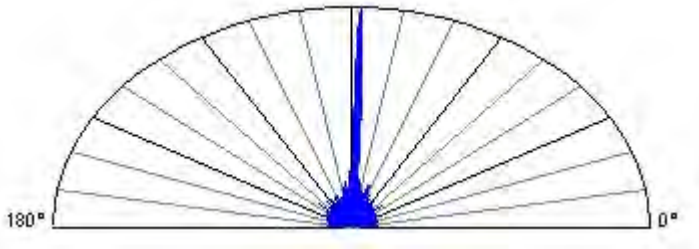


b)



Rys. 5.4. Obrazy SGP elementów przyjętych do badań uzyskane konfokalnym laserowym mikroskopem skaningowym w układzie: a) dwuwymiarowym, b) trójwymiarowym

Obrazy charakteryzują się dużą szczegółowością stereometrii powierzchni, co wynika z rozdzielczości mikroskopu. Liczba i wymiary śladów obróbki są wyraźne i łatwe do zidentyfikowania. Ślady obróbki są wyraźnie ukierunkowane – występuje więc znaczna anizotropowość, co ma również odzwierciedlenie na przedstawionym wykresie stopnia izotropowości (rys. 5.5).



Iz = 8,01%

Rys. 5.5. Wykres stopnia izotropowości – róża morfologiczna struktur przedstawionych na rysunku 5.4

Przedstawiony wykres stopnia izotropowości wyznaczono z powierzchniowej funkcji autokorelacji za pomocą maszyny pomiarowej Talyscan 150 firmy Taylor Hobson z wykorzystaniem programu TalyMap Expert.

Jako tworzywo konstrukcyjne próbek przyjęto stal 102Cr6 (NC6). Stal ta charakteryzuje się małym rozrzutem twardości po obróbce cieplnej. Jedną z wielkości zmiennych w czasie badań jest właśnie twardość materiału próbek jako wielkość charakteryzująca stan warstwy wierzchniej. Po to, aby twardość próbek mieściła się w wąskim zakresie rozrzutu, wybrano do badań ten materiał. W tabeli 5.1 podano skład chemiczny stali 102Cr6 według normy [252]. Dodatkowo za pomocą spektrometru 31000 RET B szwajcarskiej firmy ARL dokonano weryfikującego pomiaru składu chemicznego stali, z której wykonano próbki.

Tabela 5.1. Zestawienie składu chemicznego stali w %

Pierwiastek chemiczny	Skład stali 102Cr6 wg PN [252]	Pomierzony skład stali 102Cr6
C	0,95÷1,1	1,027
Si	0,15÷0,35	0,233
Mn	0,25÷0,45	0,444
Cr	1,35÷1,65	1,359
S	max 0,03	0,003
P	max 0,03	0,015

Z przedstawionego zestawienia wynika, że skład chemiczny stali użytej na próbki mieści się w normatywnych zakresach.

W celu rozszerzenia zbioru analizowanych materiałów w prezentowanych badaniach uwzględniono, chociaż w ograniczonym zakresie, powłoki nanoszone na współpracujące ciernie powierzchnie.

5.2.2. Model i warunki badań

Ogólnie zrealizowane badania własne ukierunkowane były na dwa obszary. Jeden z nich dotyczył zrealizowania poprawnych pod względem metodycznym badań eksperymentalnych, a następnie na tej podstawie opracowania zależności matematycznych. Opracowane równania regresji będą wyznaczać relacje między zaobserwowanymi zmianami modelu badawczego a obiektem rzeczywistym, umożliwią tym samym optymalizację procesu zużywania badanych par kinematycznych.

Zrealizowanie założonego celu, czyli wyznaczenie relacji między rozkładem ukształtowania struktury geometrycznej powierzchni opisanej stopniem izotropowości a intensywnością procesu zużywania, jak już wcześniej sygnalizowano, wymagało przyjęcia określonego programu oraz modelu badań.

Ważnym elementem w działaniach wynikających z programu badawczego jest przyjęcie optymalnego do celu badawczego planu eksperymentu. Przeprowadzona analiza wykazała, że ze względu na założony zakres wykorzystania wyników badań i wynikających z tego potrzeb najodpowiedniejsza będzie realizacja planu: statycznego, zdeterminowanego, kompletnego, różnowartościowego, w literaturze oznaczonego symbolem PS/DK – v [247, 248].

Dokonano wyboru statycznego wariantu planu badań, ponieważ na podstawie posiadanej wiedzy z zakresu par kinematycznych ze stykiem konforemnym zbiór badanych czynników można było określić przed badaniami, bez obawy o pominięcie jakiegoś istotnego czynnika; posiadana wiedza pozwalała także na przyjęcie planu zdeterminowanego – wykluczającego wpływ czynników losowych. Plan statyczny, zdeterminowany, kompletny jest podstawowym planem badań i jego przyjęcie podyktowane było chęcią uzyskania możliwie obszernego zbioru wyników, które umożliwiałyby właściwe wnioskowanie i dokonanie uogólnień. Plan różnowartościowy – umożliwia zastosowanie różnych liczb wartości poszczególnych wielkości badanych.

W celu realizacji przyjętego planu należy wykonać N_k doświadczeń. Liczbę tę określa się ze wzoru:

$$N_k = r\prod_{i=1}^{k} n_i \tag{5.2}$$

gdzie:

- r – liczba powtórzeń, (r > 1),
- k – liczba badanych czynników,
- n_i – liczba wartości i-tego czynnika, gdzie i = 1, 2, ... k.

Plan jest bardzo obszerny i pracochłonny, jednak dla przyjętych zbiorów wartości zmiennych niezależnych jest jeszcze możliwy do zrealizowania.

Na podstawie przeprowadzonej analizy informacji literaturowych i wyodrębnionych obszarów wiedzy o transformacji warstwy wierzchniej, wymagających uzupełnienia i zweryfikowania, zasadnicze badania eksperymentalne podzielono na trzy etapy badawcze.

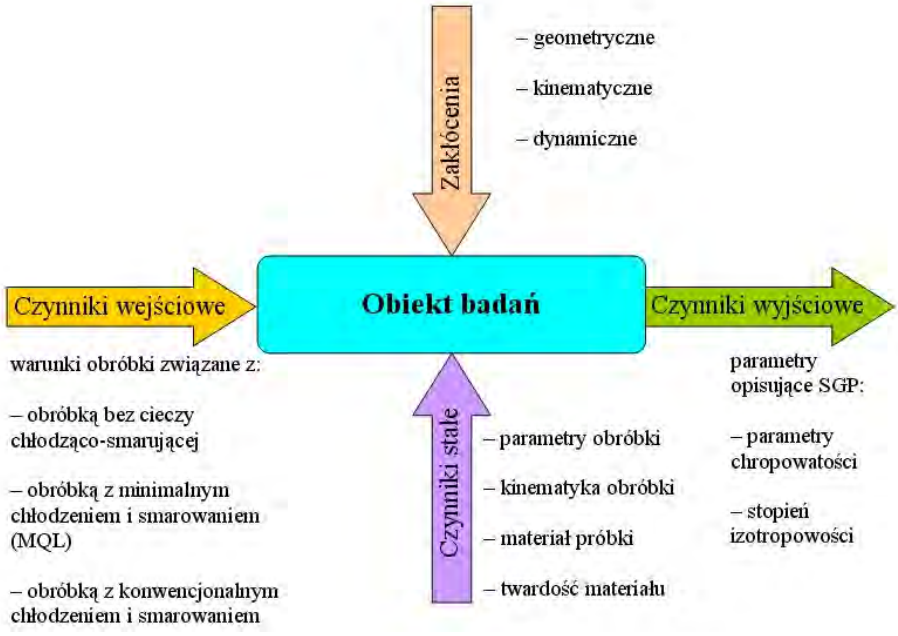
Wszystkie etapy dotyczyły przede wszystkim weryfikacji możliwości przyjęcia stopnia izotropowości SGP do opisu zachodzących zmian podczas transformacji warstwy wierzchniej.

Jeden mający charakter uproszczonej weryfikacji dotyczył zmian TWW, natomiast dwa główne etapy badań – analizy zmian EWW.

Etap badań obejmujący konstytuowanie warstwy wierzchniej w procesie wytwarzania posłużył do wstępnej weryfikacji oddziaływania ilości lub braku cieczy chłodząco-smarującej na SGP, a więc dotyczył aspektu oddziaływania ekologicznego.

Obecnie obok ubytkowych metod konstytuowania warstwy wierzchniej coraz częściej stosuje się obróbki przyrostowe. Z tego powodu w etapie badawczym związanym z TWW przeprowadzono dodatkowe rozpoznawcze badania eksperymentalne dotyczące zmiany stanu SGP przy nanoszeniu powłok.

Na rysunku 5.6 przedstawiono model badań, który przyjęto w celu realizacji pierwszego etapu, czyli oceny wpływu warunków obróbki, ukierunkowanych na oddziaływanie ekologiczne, na cechy SGP kształtowanych elementów.



Rys. 5.6. Model przyjęty w pierwszym etapie badań eksperymentalnych

W przyjętym modelu badawczym sterowanymi wielkościami wejściowymi były czynniki mające oddziaływanie ekologiczne, czyli ciecz obróbkowa i jej ilość. Oczywisty wpływ na SGP pozostałych wielkości związanych z warunkami obróbki, czyli parametrów technologicznych i kinematyki, ze względu na obszerne informacje literaturowe nie był rozpatrywany i został przyjęty jako czynnik stały.

Ocenę wpływu – bądź jego braku – cieczy chłodząco-smarującej na SGP dokonano dla obróbki szlifowaniem jako dominującej obróbki wykończeniowej przy następujących zmiennych niezależnych:

- obróbka bez udziału cieczy obróbkowej – na sucho (S),
- obróbka z minimalnym smarowaniem mgłą olejową przy wydatku 50 $ml \cdot h^{-1}$ (MQL),
- obróbka z konwencjonalnym chłodzeniem i smarowaniem 5% emulsją przy wydatku 4 $l \cdot min^{-1}$ (E).

Kontrolowanymi wielkościami wyjściowymi były czynniki opisujące uzyskaną SGP. Do czynników tych – poza powszechnie stosowanymi parametrami chropowatości (Ra, Rq) – zaliczono również stopień izotropowości tych struktur (Iz).

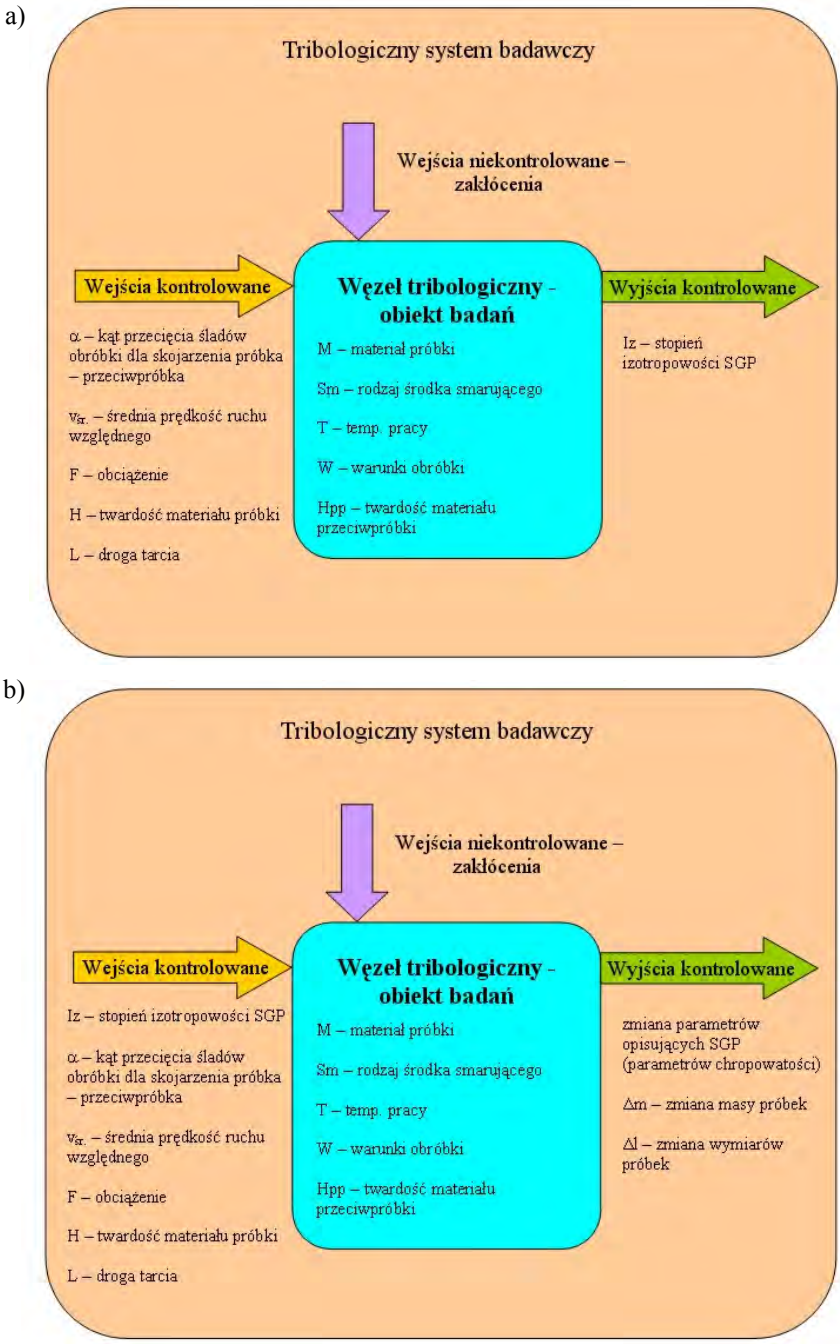
Za wielkości stałe poza wymienionymi już czynnikami przyjęto rodzaj materiału próbek – stal 102Cr6 o twardości 30±2 HRC.

Do niekontrolowanych, losowych czynników wejściowych – zakłóceń zaliczono zróżnicowanie SGP próbek wynikające z zakłóceń obróbki:

- geometrycznych spowodowanych geometrią ostrza (zużywanie narzędzia),
- kinematycznych wynikających z łańcucha kinematycznego, z odchyłek wykonawczych elementów tworzących ten łańcuch,
- dynamicznych wynikających z drgań spowodowanych m.in. biciem elementów.

Dwa główne etapy badań eksperymentalnych dotyczyły weryfikacji możliwości przyjęcia stopnia izotropowości SGP do opisu zachodzących zmian warstwy wierzchniej w czasie eksploatacji pary ciernej. Jeden z tych etapów badań obejmował wyznaczenie relacji między zmianami stopnia izotropowości SGP w funkcji wymuszeń eksploatacyjnych i stanu materiału w czasie pracy węzła tarcia. W drugim etapie określono relacje między wielkościami opisującymi zużywanie a stopniem izotropowości oraz wymuszeniami eksploatacyjnymi i twardością materiału próbek.

Na rysunkach 5.7a i b przedstawiono model badań, który przyjęto do realizacji głównych etapów badań eksperymentalnych. Model ten został tak zbudowany, aby było możliwe wykonanie równoległe obydwóch głównych etapów badań eksperymentalnych bez konieczności powtarzania czasochłonnych eksperymentów tribologicznych.



Rys. 5.7. Model badań przyjęty w głównych etapach badań eksperymentalnych: a) struktura zależności między stopniem izotropowości a wielkościami wejściowymi, b) struktura zależności między czynnikami określającymi zużywanie a wielkościami wejściowymi

Na podstawie informacji literaturowych dokonano wyboru wielkości stanowiących zbiór kontrolowanych czynników wejściowych. Zbiór tych wielkości zawierał poniższe składowe:

- kąt między śladami obróbki współpracujących elementów, α,
- średnią prędkość ruchu względnego, $v_{śr.}$,
- obciążenie, F,
- twardość materiału próbek, H,
- drogę tarcia, L.

W drugim etapie eksperymentalnych badań głównych do zbioru zmiennych niezależnych dodatkowo zaliczono stopień izotropowości SGP (Iz) na poszczególnych etapach pomiarowych i również od tej wielkości uzależniono przebieg zużywania.

Dla poszczególnych wielkości ze zbioru zmiennych niezależnych na podstawie analizy informacji literaturowych oraz badań wstępnych, przyjęto wartości przedstawione poniżej.

Kontrolowane wielkości wejściowe związane z ukształtowaniem struktury powierzchni w czasie eksperymentów tribologicznych przyjmowały następujące wartości:

- stopień izotropowości zawierał się w przedziale 7,98÷17,5%,
- kąt między charakterystycznymi śladami obróbki (kierunkowość SGP): 0º, 30º, 45º, 60º, 90º.

Konstrukcja stanowiska badawczego umożliwiała płynną zmianę prędkości ruchu względnego podczas badań w zakresie od 0,01 do 0,3 $m \cdot s^{-1}$. Do badań przyjęto trzy punkty pomiarowe, dla których średnia prędkość ruchu względnego podczas badań wynosiła: 0,05 $m \cdot s^{-1}$ (3 $m \cdot min^{-1}$), 0,1 $m \cdot s^{-1}$ (6 $m \cdot min^{-1}$), 0,2 $m \cdot s^{-1}$ (12 $m \cdot min^{-1}$).

Próbki z przeciwpróbką współpracowały przy obciążeniach zewnętrznych wynoszących: 300, 450 i 600 N, co przy łącznej powierzchni styku trzech próbek z przeciwpróbką, wynoszącej 300 mm^2, odpowiadało teoretycznym naciskom w strefie styku odpowiednio: 1,0, 1,5 i 2,0 MPa.

Uwzględniając materiał próbek i przeciwpróbki, przyjęto następujące twardości próbek: 30, 40 i 50 HRC.

Częstotliwość pomiarów przyjęta w badaniach zasadniczych została ustalona na podstawie badań wstępnych, które posłużyły również do weryfikacji przyjętej metodyki. Na początku współpracy próbek z przeciwpróbką pomiary były dokonywane po przebyciu drogi tarcia 100 m ($12,5 \cdot 10^3$ cykli). Po drodze tarcia wynoszącej 600 m stwierdzono stabilizację zmian wartości wielkości mierzonych w przyjętych warunkach. W celu potwierdzenia stabilizacji zmian pomiary były kontynuowane i dokonywane co 200 m ($25 \cdot 10^3$ cykli) do drogi tarcia wynoszącej 2000 m ($250 \cdot 10^3$ cykli).

Ze względu na potwierdzoną stabilizację zmian w badaniach zasadniczych analizę zmian ograniczono tylko do początkowego okresu współpracy – okresu

docierania (pomijając okres po stabilizacji) i pomiary wykonywano wówczas tylko dla następujących dróg tarcia: 100, 200, 300, 400, 500 i 600 m.

W przedstawionym powyżej programie badań za czynniki wejściowe przyjęto więc pięć badanych wielkości (k = 5), które miały odpowiednio 5, 3, 3, 3 i 6 wartości (n_i).

Na podstawie przeprowadzonych badań wstępnych określono niezbędną liczbę powtórzeń. Dla stwierdzonego w nich rozrzutu wyników obliczona według wzoru [86]:

$$n = \frac{t_\alpha^2 \cdot \hat{s}^2}{d^2} \tag{5.3}$$

gdzie:

t_α – wartość rozkładu t-Studenta,

$\hat{s}^2$ – estymator wariancji,

d – błąd szacunkowy,

minimalna liczba próby wynosi 8.

Zrealizowanie badań według przedstawionego programu zgodnie z cytowaną zależnością (5.2) wymagało dokonania 6480 doświadczeń. Ze względu na to, że w czasie jednego cyklu badano jednocześnie trzy próbki, liczba niezbędnych doświadczeń zmniejszyła się do 2160.

Do zbioru wielkości obserwowanych na wyjściu kontrolowanym na podstawie informacji literaturowych poza stopniem izotropowości w drugim etapie badań zasadniczych przyjęto wielkości charakteryzujące bezpośrednio proces zużywania: ubytek masowy Δm i liniowy Δl oraz wielkości opisujące zmiany struktury geometrycznej powierzchni – parametry chropowatości. Do zbioru parametrów chropowatości na podstawie literatury oraz przeprowadzonych analiz i selekcji wybrano następujące parametry chropowatości: parametry amplitudowe Rq i Rt oraz parametr charakteryzujący krzywą nośności Rpk.

Wymienione parametry wybrano ze względu na ich przydatność w analizie struktury geometrycznej powierzchni pod kątem jej ukierunkowania. Parametr Rq, który jest średnią kwadratową rzędnych profilu, jest funkcjonalnie powiązany z parametrem Ra (średnią arytmetyczną rzędnych profilu) powszechnie stosowanym w praktyce przemysłowej z uwagi na względną powtarzalność i stabilność. Do analiz naukowych lepszym parametrem jest jednak Rq z powodu własności statystycznych. Jest to bowiem odchylenie średniokwadratowe, czyli odpowiednik odchylenia standardowego σ powszechnie stosowanego w statystyce. Rq jest więc równy statystycznie odchyleniu standardowemu rzędnych profilu.

Parametr Rt – całkowita wysokość profilu oraz Rpk – zredukowana wysokość wzniesień profilu dobrze charakteryzują zmiany na powierzchni w początkowym okresie współpracy. Rpk jest średnią wysokością górnej części profilu powierzchni, tj. wzniesień profilu wystających ponad jego rdzeń. Charakteryzuje on zachowanie SGP podczas docierania współpracujących powierzchni. Pa-

rametr Rt w odróżnieniu od innych parametrów amplitudowych wyznaczany jest z odcinka pomiarowego ln, natomiast pozostałe – z odcinka elementarnego lr, który jest częścią odcinka pomiarowego i jest bardzo wrażliwy na występowanie pojedynczych wzniesień i wgłębień.

W celu pełniejszego opisu transformacji warstwy wierzchniej do czynników wyjściowych zaliczono również parametry opisujące zmiany w sposób jakościowy. Do jakościowej oceny stanu SGP przyjęto fotografie badanych powierzchni w poszczególnych punktach pomiarowych zmian warstwy wierzchniej. Do analizy wykorzystano również wykresy funkcji: gęstości widmowej mocy oraz autokorelacji, na podstawie których wyznaczany był stopień izotropowości SGP.

Do czynników stałych podczas badań, jak już wcześniej opisano, zaliczono tworzywo konstrukcyjne próbek – stal 102Cr6 (NC6) oraz przeciwpróbki. Materiał przeciwpróbki oraz jej twardość podczas badań nie ulegały zmianie. Wykonana ona była ze stali X210Cr12 (NC11) zahartowanej do twardości 60±2 HRC. W celu ukierunkowania procesu zużywania twardość przeciwpróbki zdecydowanie przewyższała twardość próbek, tak więc transformacja warstwy wierzchniej następowała przede wszystkim w próbkach. Stan SGP przeciwpróbki był okresowo kontrolowany – struktura nie wykazywała istotnych oznak zużycia.

Do czynników stałych zaliczono również: warunki obróbki elementów badanych – powierzchnie szlifowane ze stałymi parametrami obróbki i z zastosowaniem minimalnego chłodzenia i smarowania, temperaturę pracy (temperaturę, w której zachodziła transformacja WW) równą temperaturze otoczenia – 293 K oraz środowisko pracy – ośrodek smarujący, jakim był olej maszynowy (L – AN 68).

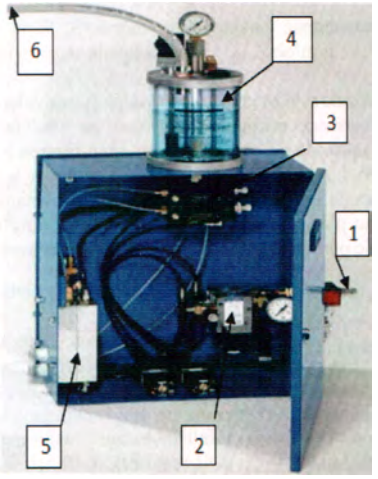
W tych etapach badawczych do niekontrolowanych, losowych czynników wejściowych – zakłóceń zaliczono ponadto:

- drgania wynikające z odchyłek wykonawczych elementów stanowiska,
- zanieczyszczenie środowiska pracy,
- zróżnicowanie SGP próbek spowodowane, np. procesem zużywania narzędzia,
- zmienność siły docisku wynikającą z montażowej odchyłki ugięcia sprężyny,
- rozrzut twardości próbek, który może być spowodowany np. niejednorodnością materiału próbek w całej jego objętości.

5.2.3. Budowa i zasada działania stanowiska badawczego

Poszczególne etapy eksperymentalne zrealizowano na stanowiskach badawczych będących na wyposażeniu Zakładu Inżynierii Produkcji Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, które częściowo zmodernizowano, tak aby zrealizować przyjętą metodykę badań.

Realizację pierwszego etapu badawczego, czyli weryfikację oddziaływania na SGP ilości cieczy chłodząco-smarującej lub jej braku, przeprowadzono za pomocą dozownika (rys. 5.8), umożliwiającego minimalne chłodzenie i smarowanie strefy obróbkowej.

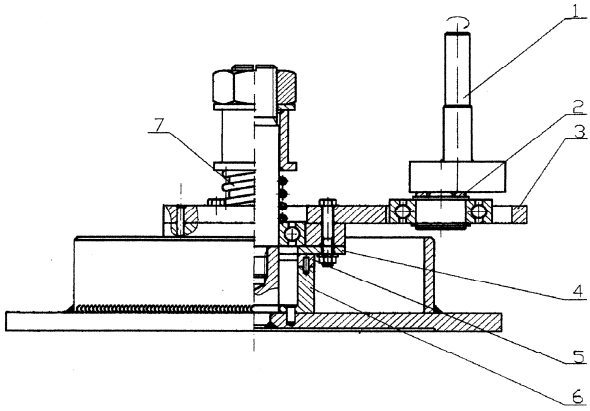


Rys. 5.8. Dozownik minimalnego chłodzenia i smarowania Minibooster II (opis w tekście)

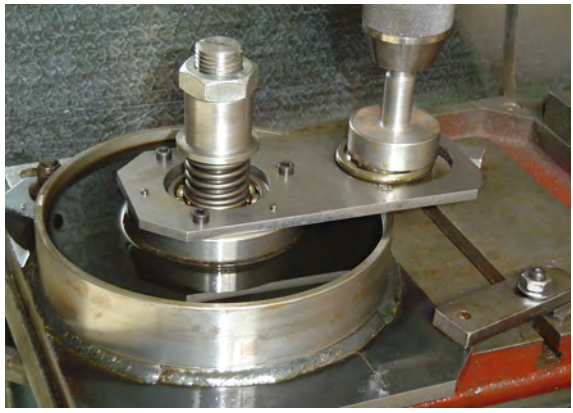
Dozownik minimalnego chłodzenia i smarowania Minibooster II firmy Accu-Lube Manufacturing GmgH wytwarza mgłę olejową z mieszaniny powietrza i oleju roślinnego LB8000 firmy Accu-Lube o lepkości kinematycznej 37 $mm^2 \cdot s^{-1}$ w 40°C. W celu wytworzenia mgły olejowej zawór zasilający (1) podłączono do źródła sprężonego powietrza (0,6 MPa). Doprowadzone powietrze przepływa następnie przez generator częstotliwości (2), którego zadaniem jest generowanie impulsów powietrza o określonej częstotliwości, wynikającej z wymaganych właściwości mgły olejowej. Wytworzone impulsy powietrza przepływają do pompy oleju (3), która w zależności od ustawionego skoku cylindra pobiera określoną ilość oleju ze zbiornika oleju (4) i przesyła ją, zgodnie z ustaloną częstotliwością impulsów powietrza, do komory mieszania – miniboster (5). Doprowadzone w ten sposób do komory mieszania powietrze powoduje atomizację oleju i wytworzenie mgły olejowej, która następnie kierowana jest do zbiornika oleju. Zmagazynowana w tym zbiorniku mgła olejowa przepływa następnie wężem (6) do dysz dozujących ją do strefy obróbkowej.

Realizację głównych etapów badań eksperymentalnych, dotyczących przede wszystkim weryfikacji możliwości przyjęcia stopnia izotropowości SGP do opisu zachodzących zmian warstwy wierzchniej, przeprowadzono na zmodernizowanym przyrządzie do badań tribologicznych. Na rysunku 5.9 przedstawiono jego postać konstrukcyjną i fizyczną.

a)



b)



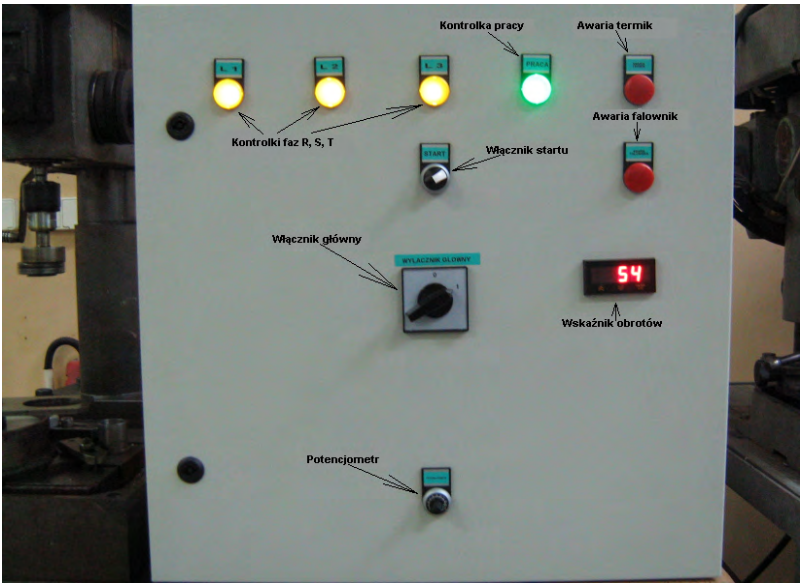
Rys. 5.9. Tribologiczny przyrząd badawczy: a) postać konstrukcyjna (opis tekście), b) postać fizyczna

Badane próbki (5) mocuje się w trzech rowkach wykonanych co 120° na czole tulei ustalającej próbki (6). Uzyskuje się w ten sposób pewny i równomierny trójpowierzchniowy docisk współpracujących elementów realizowany za pomocą sprężyny (7). Próbki umieszczone są w tulei nieruchomo, a względny, oscylacyjny ruch wykonuje przeciwpróbka (4). Ruch oscylacyjny, przekazywany na łożyskowaną przeciwpróbkę, uzyskuje się przez zmianę ruchu obrotowego na ruch liniowy za pomocą dźwigni (3) i mimośrodu (2). Zmianę długości przemieszczeń względnych próbki i przeciwpróbki (elementarnej drogi tarcia) uzyskuje się za pomocą mimośrodu o różnych wartościach przesunięcia jego osi. Po to, aby zminimalizować zużycie elementów stanowiska, mimośród oddziałuje na dźwignię poprzez łożysko toczne.

Kolejne wartości obciążenia uzyskuje się w rezultacie zmiany napięcia sprężyny (7) lub w wyniku stosowania sprężyn o różnej charakterystyce. Dzięki stosowaniu sprężyny wartość docisku jest stała.

Sterowanie przyrządu umożliwia dowolną regulację prędkości obrotowej wrzeciona wiertarki, stanowiącej napęd przyrządu tribologicznego, w zakresie od 0 do 50 Hz. Tym samym istnieje możliwość uzyskania dowolnej w zakresie możliwości napędu elektrycznego prędkości ruchu względnego próbki i przeciwpróbki.

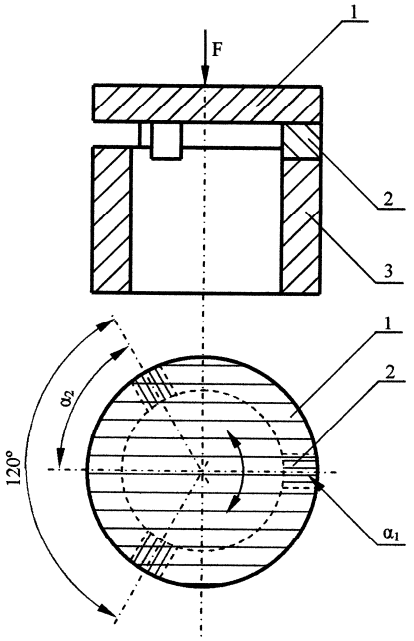
Na rysunku 5.10 przedstawiono poglądowo zdjęcie szafy sterującej przyrządu tribologicznego.



Rys. 5.10. Widok płyty czołowej szafy sterującej przyrządu tribologicznego

Wyświetlacz obrotów, umieszczony na płycie czołowej szafy sterującej, informuje o przybliżonej wartości obrotów wrzeciona. Błąd wskazania nie przekracza ±2%. Potencjometr, umieszczony na przedniej płycie szafy sterującej, umożliwia bezpośrednią regulację prędkości obrotowej wrzeciona bez konieczności ciągłej i czasochłonnej ingerencji w ustawienia falownika.

Z uwagi na to, że ślady po obróbce determinują stopień izotropowości, istotne było uzależnienie współpracy próbek z przeciwpróbką od skojarzenia kątowego między ich charakterystyczną kierunkowością struktur, co było jednym z warunków przyjętej metodyki badawczej związanej z ukształtowaniem SGP. Na rysunku 5.11 przedstawiono zasadę kojarzenia próbek z przeciwpróbką ze względu na kąt przecięcia śladów obróbki. W przykładzie przedstawionym na rysunku $\alpha_1 = 0^o$ i $\alpha_2 = 60^o$.



Rys. 5.11. Zasada współpracy próbek z przeciwpróbką ze względu na kąt przecięcia śladów obróbki: 1 – przeciwpróbka; 2 – próbki; 3 – tuleja ustalająca próbki

W celu realizacji przyjętej metodyki badawczej stanowisko badawcze wyposażone było w układy pomiarowe, które umożliwiały pomiar wartości wielkości przyjętych jako czynniki wyjściowe.

Stopień izotropowości wyznaczano z powierzchniowej funkcji autokorelacji za pomocą maszyny pomiarowej Talyscan 150 firmy Taylor Hobson z wykorzystaniem programu TalyMap Expert.

Zmianę masy próbek w czasie badań zaobserwowano na podstawie pomiarów dokonywanych za pomocą analitycznej wagi laboratoryjnej WAX 220 z dokładnością do 0,01 miligrama.

Zmiany wymiaru liniowego próbek określano przez porównanie ze wzorcem na profilografometrze z dokładnością 0,1 μm.

Pomiarów parametrów chropowatości SGP dokonano za pomocą profilografometru Hommel Tester T 2000 firmy Hommel Werke.

Do analizy jakościowej zastosowano konfokalny laserowy mikroskop skaningowy LEXT OLS3100 firmy OLYMPUS oraz maszynę pomiarową Talyscan 150 firmy Taylor Hobson wraz z oprogramowaniem TalyMap Expert.

5.2.4. Weryfikacja metodyki badawczej

W celu weryfikacji poprawności przyjętej metodyki badawczej dotyczącej wyznaczenia relacji między rozkładem ukształtowania struktury geometrycznej powierzchni opisanej stopniem izotropowości a intensywnością procesu zuży-

wania przeprowadzono badania wstępne. Badania te umożliwiły również wyznaczenie okresu współpracy, w którym zmiany były intensywne, a więc okresu docierania. Określono drogę tarcia, po której następowała stabilizacja zmian dla przyjętej metodyki badawczej i dalsza kontrola zmian nie wnosiła już istotnych informacji do analizy relacji między wielkościami wejściowymi a wyjściowymi w przyjętym modelu badań.

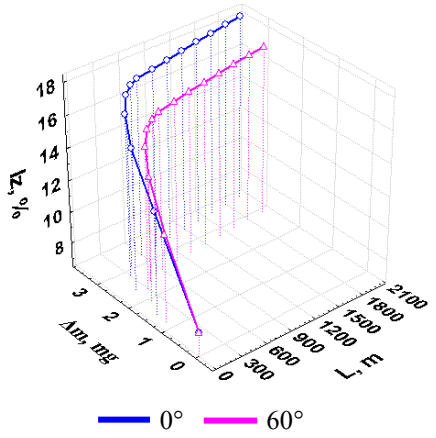
Warunki badań wstępnych (wymuszeń zewnętrznych) zostały przyjęte na podstawie analizy danych literaturowych. Zostały one tak dobrane, aby prawdopodobne zmiany warstwy wierzchniej były wyraźne oraz jednoznaczne i wynosiły: obciążenie zewnętrzne: 300 N (1,0 MPa) i 600 N (2,0 MPa), prędkość ruchu względnego – 0,2 $m \cdot s^{-1}$ (12 $m \cdot min^{-1}$). Badania te przeprowadzono dla ulepszonej stali C45 o twardości 40 HRC, przeciwpróbka wykonana była ze stali 102Cr6 zahartowanej do twardości 60 HRC. Twardość przeciwpróbki zdecydowanie przewyższała (o 50%) twardość próbek, aby zachodzące zmiany występowały przede wszystkim w WW próbek, które pracowały w ośrodku smarującym, jakim był olej maszynowy (L – AN 68).

W badaniach wstępnych poza wymienionymi powyżej wielkościami wejściowymi jako zmienną niezależną obserwacji zmian w warstwie wierzchniej przyjęto wielkość charakteryzującą ukształtowanie SGP, czyli kąt przecięcia śladów obróbki dla skojarzenia próbka – przeciwpróbka wynoszący: 0 i 60º.

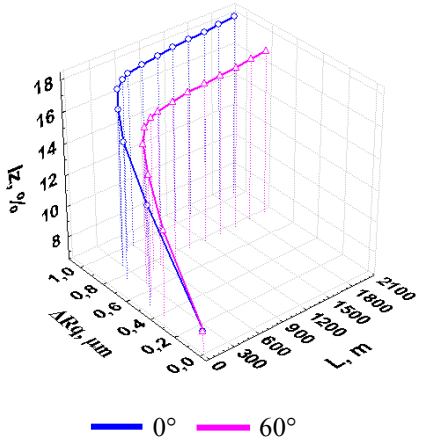
Jako wielkości opisujące zmiany zachodzące w WW przyjęto stopień izotropowości struktury powierzchni (Iz), bezwzględny ubytek masy próbek (Δm) jako bezpośrednią miarę zużywania oraz wartości parametru chropowatości Rq.

W badaniach, które były pięciokrotnie powtarzane, dokonywano pomiarów co $12{,}5 \cdot 10^3$ cykli, co odpowiada drodze tarcia wynoszącej 100 m. Gdy stwierdzono stabilizację zmian dla przyjętych warunków po przebyciu drogi tarcia wynoszącej ok. 600 m, w celu potwierdzenia stabilizacji zmian pomiary były kontynuowane i dokonywane co 200 m ($25 \cdot 10^3$ cykli) do drogi tarcia wynoszącej 2000 m ($250 \cdot 10^3$ cykli).

Uśrednione wyniki badań wstępnych przedstawiono w postaci wykresów. Na rysunku 5.12 przedstawiono relacje między zmianą stopnia izotropowości Iz, ubytkiem masy próbek Δm oraz drogą tarcia L, natomiast na rysunku 5.13 – relacje między zmianą stopnia izotropowości Iz, zmianą wartości parametru chropowatości ΔRq oraz drogą tarcia L.



Rys. 5.12. Relacje między stopniem izotropowości Iz, ubytkiem masy próbek Δm oraz drogą tarcia L przy obciążeniu 600 N dla różnych skojarzeń kątowych śladów obróbki



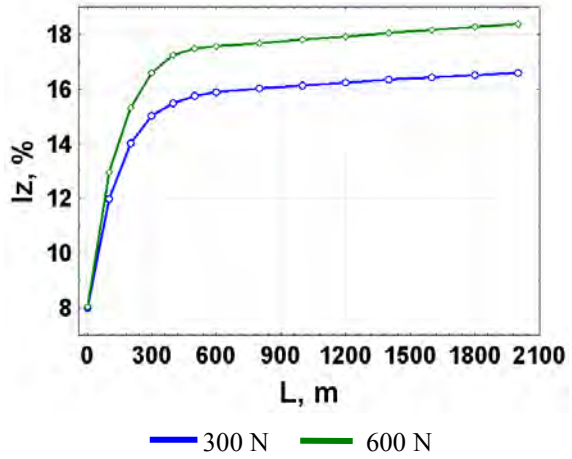
Rys. 5.13. Relacje między stopniem izotropowości Iz, zmianą wartości parametru chropowatości ΔRq oraz drogą tarcia L przy obciążeniu 600 N dla różnych skojarzeń kątowych śladów obróbki

Na wykresach zaobserwować można, że wraz ze zwiększaniem drogi tarcia następuje wzrost stopnia izotropowości, ubytku masy oraz zmiany wartości parametru chropowatości. Kąt współpracy wynikający z kierunkowości ukształtowania struktury powierzchni ma również wpływ na przebieg transformacji warstwy wierzchniej. Dla kąta $\alpha_1 = 0°$ następują większe zmiany niż dla kąta $\alpha_2 = 60°$.

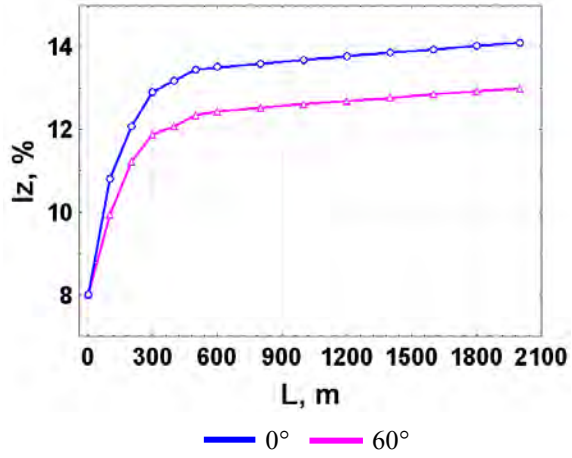
Z przebiegu wykresów wynika również, że po określonej drodze tarcia następuje stabilizacja zmian. Intensywne zmiany (okres docierania) występują do

drogi tarcia wynoszącej około 600 m, po przekroczeniu tej granicy zmiany się stabilizują.

Zasadność wykorzystania do opisu zmian w WW stopnia izotropowości struktury potwierdzają również wykresy przedstawione na rysunkach 5.14 i 5.15.



Rys. 5.14. Zmiana stopnia izotropowości Iz w funkcji drogi tarcia L dla różnych obciążeń zewnętrznych



Rys. 5.15. Zmiana stopnia izotropowości Iz w funkcji drogi tarcia L dla różnych skojarzeń kątowych charakterystycznych śladów po obróbce

Analiza tych wykresów pozwala zaobserwować, że wraz ze zwiększaniem drogi tarcia do określonej wartości następuje wzrost stopnia izotropowości, po czym następuje stabilizacja zmian.

Na podstawie wykresów stwierdzić można, że intensywność zachodzących zmian opisana stopniem izotropowości zależy również od warunków współpracy pary ciernej, wynikających z wymuszeń eksploatacyjnych – obciążenia (rys. 5.14) oraz od kąta przecięcia charakterystycznej kierunkowości (rys. 5.15). Przy czym obciążenie wywołuje większe zmiany niż kąt skojarzenia kierunkowości.

Z uwagi na potwierdzenie istotności stopnia izotropowości SGP w opisie zachodzących zmian podczas współpracy pary ciernej oraz pozytywnego zweryfikowania przyjętej metodyki i modelu badawczego uznano za celowe przeprowadzenie badań zasadniczych przy większym zbiorze wielkości badanych oraz liczby ich wartości. Badania takie umożliwiły określenie wzajemnych relacji ilościowych między badanymi wielkościami.

Tym samym badania wstępne potwierdziły możliwość zastosowania do opisu transformacji warstwy wierzchniej stopnia izotropowości struktury powierzchni. Ich wyniki ze względu na stwierdzoną stabilizację zmian po określonej drodze tarcia umożliwiają na określenie częstotliwości pomiarów w badaniach zasadniczych oraz sformułowanie odpowiedzi na pytanie, jak długo prowadzić badania, aby zarejestrować istotne zmiany w WW, które rzutują na cały okres eksploatacji obiektu technicznego, w którym rozpatrywane pary kinematyczne występują.

5.3. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH I ICH INTERPRETACJA

Wyniki badań doświadczalnych zostały pogrupowane w cztery części. Analiza zmian warstwy wierzchniej przedstawiona w trzech częściach opiera się na pomiarach ilościowych, natomiast jedna to ocena jakościowa zmian. Analiza ilościowa zmian to ocena transformacji technologicznej warstwy wierzchniej oraz transformacji eksploatacyjnej warstwy wierzchniej podzielonej na dwie części. Jedna z nich dotyczyła zmian badanego parametru (izotropowości SGP), uwarunkowanych wymuszeniami współpracy, natomiast druga – relacji między cechami użytkowymi determinowanymi procesem zużywania a stopniem izotropowości i warunkami współpracy. Całościowa analiza posłużyła do zweryfikowania podstawowego celu pracy, czyli możliwości wykorzystania w opisie zmian w warstwie wierzchniej stopnia izotropowości struktury powierzchni.

5.3.1. Kierunkowość w fazie kształtowania struktury powierzchni

Badania eksperymentalne przedstawione w tym podrozdziale dotyczą transformacji warstwy wierzchniej w procesie wytwarzania. Dokonano oceny wpływu warunków obróbki na cechy SGP kształtowanych elementów. Badania te miały charakter weryfikacji istotności oddziaływania ilości cieczy chłodząco-smarującej lub jej braku na konstytuowaną strukturę geometryczną powierzchni. Rozpatrywany był więc aspekt ekologiczny procesu wytwórczego. Warunki ob-

róbki, związane z rodzajem obróbki i jej parametrów z uwagi na obszerne informacje literaturowe dotyczące wpływu na tworzoną SGP, nie były rozpatrywane.

Wyniki badań miały zweryfikować wpływ – bądź jego brak – cieczy chłodząco-smarującej na ukształtowanie SGP, opisane stopniem izotropowości i parametrami chropowatości.

Badania zostały przeprowadzone według modelu badawczego scharakteryzowanego w podrozdziale 5.2.2. Kształtowanie SGP zrealizowano obróbką szlifowaniem ściernicą z elektrokorundu 99A o wymiarach Ø 350 x 50 z następującymi parametrami: prędkość obwodowa ściernicy $v_s = 26\ m \cdot s^{-1}$; prędkość posuwu stołu $v_{ft} = 13{,}4\ m \cdot min^{-1}$; głębokość szlifowania $a_p = 0{,}04$ mm.
W tabeli 5.2 przedstawiono uzyskane rezultaty dla obróbki na sucho (S), z konwencjonalnym chłodzeniem i smarowaniem emulsją (E) oraz z minimalnym chłodzeniem i smarowaniem mgłą olejową (MQL).

Tabela 5.2. Zestawienie uśrednionych rezultatów badań dla różnych warunków obróbki związanych z ilością lub brakiem cieczy chłodząco-smarującej

Sposób chłodzenia i smarowania	Parametr chropowatości Ra, μm	Parametr chropowatości Rq, μm	Stopień izotropowości Iz, %
S	1,72	2,04	11,8
E	1,37	1,73	9,27
MQL	1,16	1,64	8,01

W celu scharakteryzowania rozrzutu wyników zrealizowanych badań przeprowadzono ich opracowanie statystyczne. Wartości podstawowych statystyk umieszczono w tabeli 5.3.

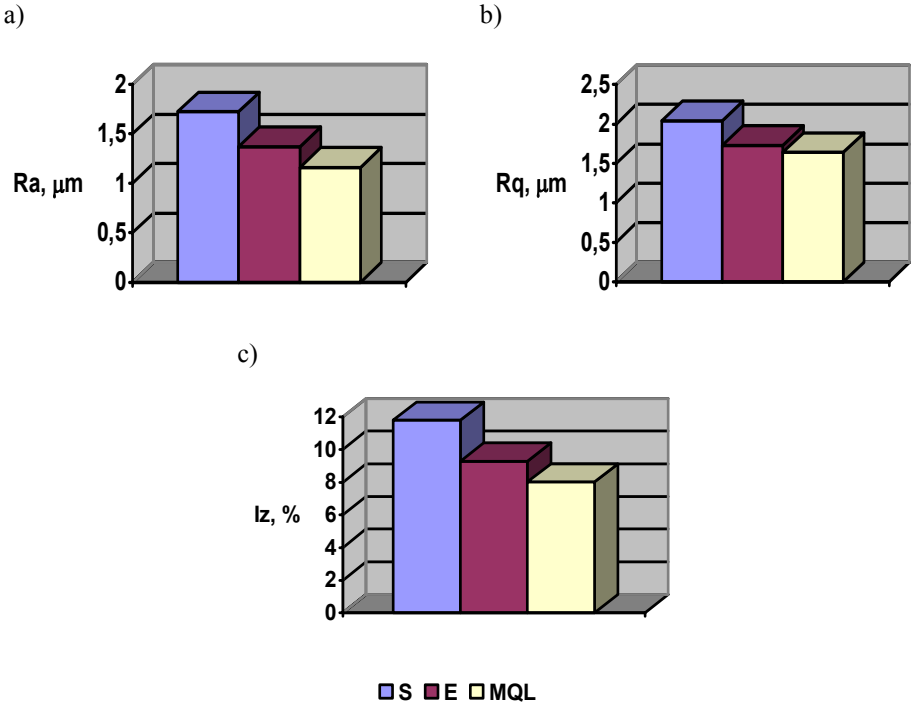
Tabela 5.3. Zestawienie rezultatów opracowania statystycznego wyników badań dla różnych warunków obróbki związanych z ilością lub brakiem cieczy chłodząco-smarującej

Parametr statystyki	S			E			MQL		
	Ra	Rq	Iz	Ra	Rq	Iz	Ra	Rq	Iz
Wartość maksymalna	1,79	2,13	11,87	1,43	1,79	9,34	1,21	1,7	8,08
Wartość minimalna	1,64	1,94	11,7	1,3	1,68	9,2	1,12	1,58	7,95
Odchylenie standardowe	0,067	0,073	0,062	0,044	0,041	0,049	0,034	0,044	0,045
Odchylenie standardowe wartości średniej	0,15	0,163	0,139	0,098	0,092	0,11	0,076	0,098	0,101

Na podstawie analizy wyników obliczeń statystycznych przedstawionych w tabeli 5.3 stwierdzono, że wartości parametrów opisujących SGP zmieniają się w małym zakresie. Z uwagi na wartość odchylenia standardowego stwier-

dzić można, że podczas obróbki z minimalnym chłodzeniem i smarowaniem oraz z konwencjonalnym udziałem cieczy powtarzalność uzyskanych wartości parametrów jest większa niż dla obróbki na sucho. Na tej podstawie można również wnioskować, że powtarzalność ukształtowania struktury powierzchni w przypadkach występowania cieczy lub mgły olejowej jest większa.

Na rysunku 5.16 przedstawiono graficznie rezultaty badań przeprowadzonych w wyżej opisanych warunkach szlifowania.



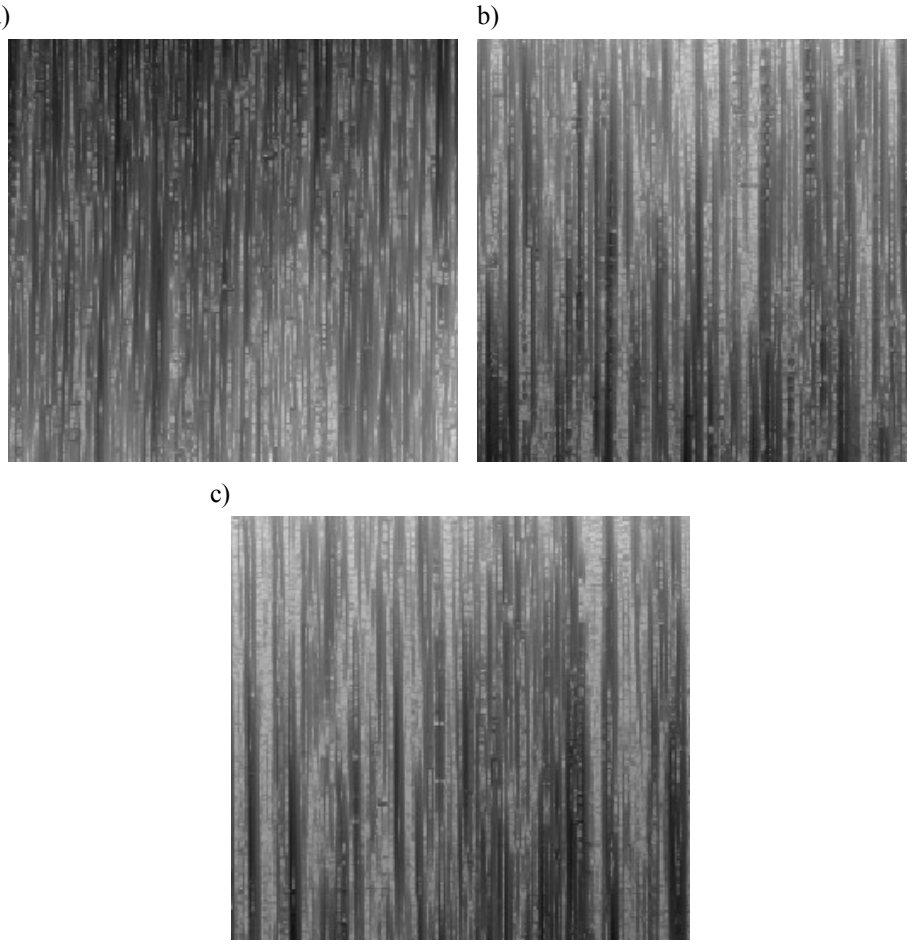
Rys. 5.16. Wpływ sposobu chłodzenia i smarowania na SGP opisaną: a) parametrem Ra, b) parametrem Rq, c) stopniem izotropowości Iz

Z przedstawionych rezultatów badań wynika, że sposób chłodzenia i smarowania oddziałuje na konstytuowaną strukturę geometryczną. W przypadku obróbki MQL uzyskuje się najmniejsze wartości parametrów opisujących ukonstytuowaną strukturę powierzchni. Największe wartości występują natomiast w przypadku obróbki na sucho. Dla obróbki z chłodzeniem i smarowaniem konwencjonalną emulsją kontrolowane parametry przyjmują wartości pośrednie. Taki charakter zmian wartości zaobserwowano dla wszystkich ocenianych parametrów opisujących SGP. Z wykresów wynika również, że wartości ocenianych wielkości w przypadku udziału w obróbce cieczy lub mgły są do siebie zbliżone, a dla obróbki na sucho wartości są wyraźnie większe.

Badania wykazały również celowość wykorzystania w opisie cech struktury geometrycznej powierzchni stopnia jej izotropowości. Z uwagi na to, że stopień izotropowości charakteryzuje ukształtowanie topograficzne powierzchni, może on być korzystniejszym wskaźnikiem uzyskanych potencjalnych cech użytkowych TWW w aspekcie procesu eksploatacji – jego sterowania i optymalizacji. Ze względu na to, że przeprowadzony fragment badań eksperymentalnych miał jedynie charakter badań weryfikujących wpływ oddziaływania ilości cieczy chłodząco-smarującej na transformację TWW, należałoby przeprowadzić kompleksowe badania eksperymentalne dotyczące wykorzystania stopnia izotropowości SGP w opisie transformacji TWW. W badaniach tych zbiór zmiennych niezależnych powinien obejmować wszystkie czynniki, które determinują technologiczną warstwę wierzchnią.

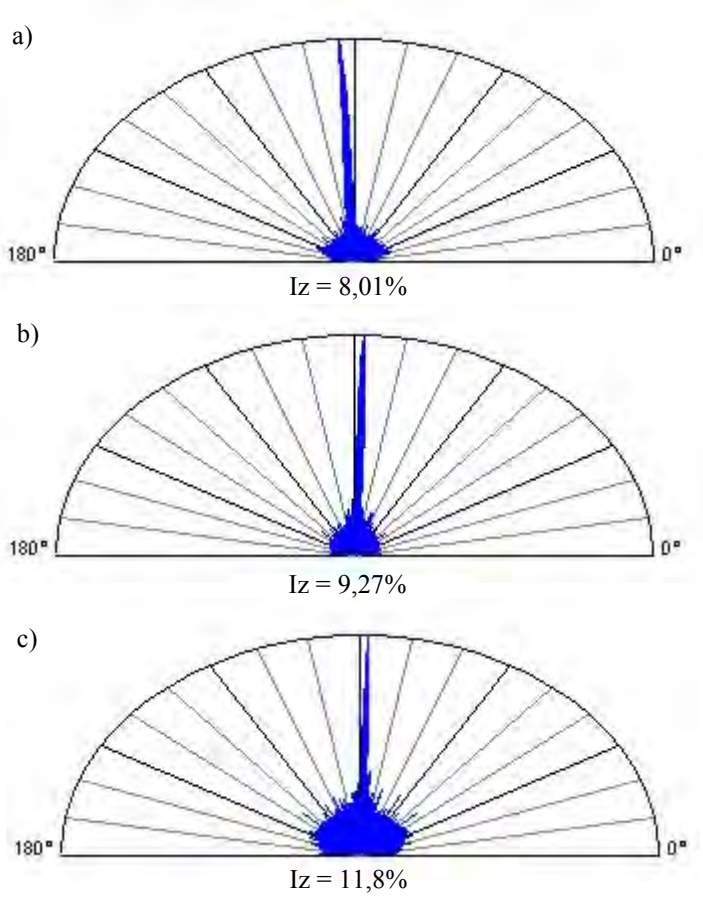
W celu zweryfikowania wpływu oddziaływania ilości cieczy chłodząco-smarującej na transformację TWW do analiz relacji czynników transformacji EWW przedstawionych w dalszej części pracy, do badań przyjęto struktury geometryczne powierzchni ukształtowane szlifowaniem z minimalnym chłodzeniem i smarowaniem. Były trzy powody podjęcia tej decyzji. Z jednej strony w literaturze jest najmniej informacji dotyczących oddziaływania minimalnego chłodzenia i smarowania na SGP elementów maszyn tworzących pary cierne w aspekcie ich cech eksploatacyjnych. Z drugiej strony uzyskane struktury charakteryzują się najmniejszymi wartościami parametrów przyjętych do opisania ukształtowania SGP, co może mieć znaczenie w analizie początkowego okresu współpracy elementów, gdy zmiany są intensywne. Z reguły podczas okresu docierania dąży się do tego, aby ukształtowanie współpracujących powierzchni jak najszybciej „dopasowało się do siebie" w celu stabilizacji warunków współpracy. Następuje wówczas zmniejszenie wartości parametrów opisujących strukturę powierzchni. Po trzecie – w procesach obróbki zwraca się obecnie coraz większą uwagę na ekologiczne oddziaływanie ilości cieczy smarująco-chłodzącej na środowisko i otoczenie.

Topografię powierzchni obrobionych w poszczególnych warunkach szlifowania przedstawiono na rysunku 5.17. Obrazy uzyskano poprzez skanowanie na maszynie pomiarowej Talyscan 150 firmy Taylor Hobson, używając programu TalyMap Expert. Na podstawie pomiarów tych powierzchni sporządzono wykresy stopnia izotropowości ukształtowanych struktur (rys. 5.18).



Rys. 5.17. Obrazy SGP w zależności od sposobu chłodzenia i smarowania w czasie obróbki: a) MQL, b) E – z udziałem emulsji, c) S – na sucho

Na przedstawionych obrazach SGP zaobserwować można wyraźne ukierunkowanie śladów obróbki. Niestety zdjęcia uzyskanych struktur uniemożliwiają przeprowadzenie bardziej szczegółowej analizy jakościowej. Wydaje się, że ze względu na ukształtowanie charakterystycznych elementów struktury są one takie same lub bardzo zbliżone i zostały ukonstytuowane w takich samych warunkach. Dopiero analiza wartości stopnia izotropowości, choć zbliżonych do siebie, pozwala zróżnicować uzyskane struktury. Na wartość stopnia izotropowości wpływ ma przede wszystkim ukierunkowanie śladów obróbki, ale również wszystkie mikro- czy wręcz nanonierówności, występujące na ukształtowaniu SGP.



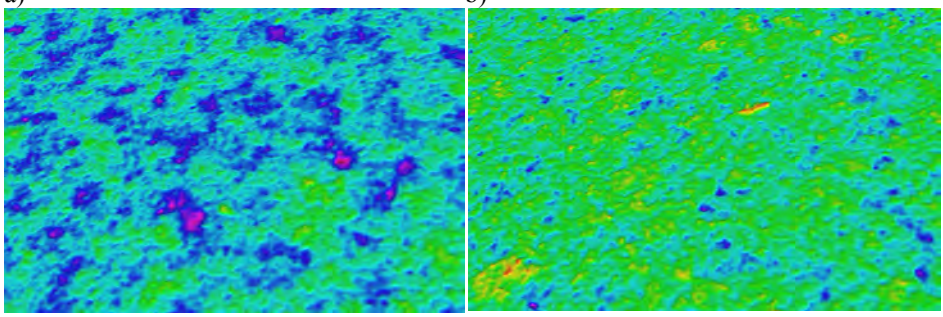
Rys. 5.18. Wykresy stopnia izotropowości SGP w zależności od sposobu chłodzenia i smarowania w czasie obróbki: a) MQL, b) E – z udziałem emulsji, c) S – na sucho

Na tej podstawie można stwierdzić, że stopień izotropowości ukształtowanych powierzchni jednoznacznie różnicuje struktury i może być przydatny do opisu relacji cech SGP uzyskiwanych podczas transformacji TWW, a także w aspekcie przyszłych zmian w czasie eksploatacji par kinematycznych.

Jednym ze sposobów modyfikowania stanu SGP powierzchni współpracujących tarciowo na etapie transformacji TWW jest nanoszenie powłok metodami fizycznymi lub chemicznymi, głównie PVD i CVD. Cienka – rzędu kilku mikrometrów – warstwa (najczęściej) ceramiki powoduje zmniejszenie intensywności procesu zużywania. Jedną z przyczyn tego zjawiska jest fakt, że naniesiona powłoka ma znacząco większą twardość niż podłoże i tym samym jest bardziej odporna na skutki wymuszeń eksploatacyjnych. Naniesienie powłoki powoduje zmiany w strukturze powierzchni, które także mogą przyczyniać się do zmniejszenia intensywności procesu zużywania [232, 233].

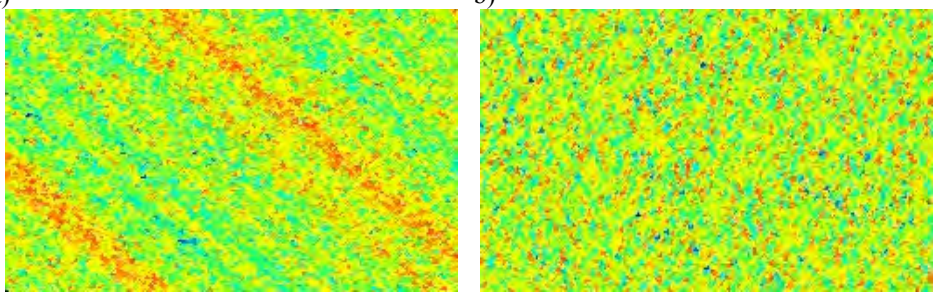
Zmiany stanu SGP są zależne od metody nanoszenia powłoki. Po to, aby ocenić istotność wpływu naniesienia powłoki na stan SGP, w tym na jej izotropowość, przeprowadzono rozpoznawcze badania eksperymentalne. Określono wartości wybranych parametrów oraz stopnia izotropowości powierzchni przed naniesieniem powłoki i po dokonaniu tego. Obserwowano powierzchnie pierwotne o wyraźnym braku ukierunkowania struktury oraz powierzchnie o widocznej anizotropii SGP i porównano je ze stanem po naniesieniu powłoki. Topografię tych powierzchni przedstawiono na rysunkach 5.19 oraz 5.20, a wartości zmierzonych parametrów zestawiono w tabeli 5.4. Badano powierzchnie izotropowe płytek narzędziowych wykonanych z węglika spiekanego WC, a anizotropią charakteryzowały się szlifowane powierzchnie ostrza wiertła krętego wykonanego ze stali narzędziowej 102Cr6. W obydwóch analizowanych przypadkach powłoka była wykonana z azotku tytanu TiN.

a) b)



Rys. 5.19. Topografia powierzchni węglika spiekanego WC: a) bez powłoki, b) z powłoką TiN

a) b)



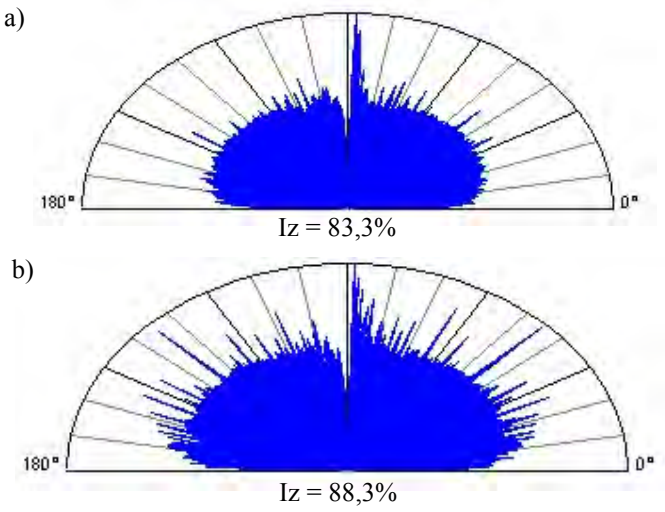
Rys. 5.20. Topografia powierzchni wiertła ze stali narzędziowej 102Cr6: a) bez powłoki, b) z powłoką TiN

Tablica 5.4. Wyznaczone wartości parametrów SGP

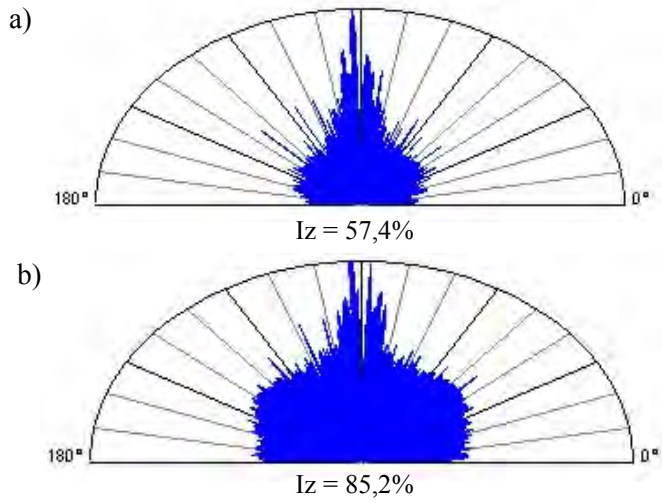
Mierzony (obliczony) parametr	Materiał podłoża			
	węglik spiekany WC		stal narzędziowa 102Cr6	
	bez powłoki	z powłoką	bez powłoki	z powłoką
Ra, µm	0,26	0,2	0,39	0,34
Rq, µm	0,33	0,26	0,45	0,39
Rt, µm	3,81	2,94	1,5	0,94
Rpk, µm	0,3	0,25	0,42	0,38
Iz, %	83,3	88,3	57,4	85,2

Powłoka ceramiczna naniesiona na badaną powierzchnię powoduje zróżnicowaną zmianę stopnia izotropowości. W przypadku powierzchni o wyraźnym braku ukierunkowania struktury (węglika spiekanego) zmiany te są nieznaczne, natomiast w przypadku powierzchni o dużej anizotropowości (stali narzędziowej) zmiany te są wyraźne. Obie naniesione powłoki charakteryzują się zbliżonym stopniem izotropowości. Z tego powodu na intensywność procesu zużywania takich powierzchni będzie wpływać przede wszystkim twardość powłoki.

Na rysunkach 5.21 i 5.22 przedstawiono wykresy stopnia izotropowości analizowanych powierzchni.



Rys. 5.21. Wykresy stopnia izotropowości SGP węglika spiekanego WC: a) bez powłoki, b) z powłoką TiN



Rys. 5.22. Wykresy stopnia izotropowości SGP wiertła ze stali narzędziowej 102Cr6: a) bez powłoki, b) z powłoką TiN

Na podstawie analizy przedstawionych wykresów można stwierdzić duże zróżnicowanie zmiany stopnia izotropowości. Dla powierzchni z węglika spiekanego naniesienie powłoki wpłynęło w niewielkim zakresie na zmianę stopnia izotropowości. W przypadku powierzchni wiertła krętego zmiana ta jest bardzo wyraźna. Dla powierzchni bez powłoki zaobserwowano jeszcze jedną wyraźną dominantę (rys. 5.22a), świadczącą o widocznym ukierunkowaniu struktury. Po naniesieniu powłoki dominanta ta zanika i powierzchnia zaczyna charakteryzować się brakiem wyraźnego ukierunkowania struktury.

Nanoszenie powłoki jest ostatnią operacją technologiczną i uzyskana w ten sposób powierzchnia stanowi końcowy etap transformacji TWW. Zgodnie z wcześniejszymi rozważaniami jest to także stan początkowy w transformacji EWW, od którego w głównej mierze zależy jej przebieg. Jest to podstawowy powód, dla którego znajomość zmian w SGP spowodowanych naniesieniem powłoki, w tym stopnia ukierunkowania, jest niezbędna do opracowania procesu technologicznego.

5.3.2. Stopień izotropowości struktury powierzchni w różnych warunkach współpracy

Wyniki badań doświadczalnych przedstawionych w tym podrozdziale dotyczą analiz ilościowych opartych na określeniu zmian stopnia izotropowości (Iz) SGP w funkcji warunków współpracy elementów tworzących parę kinematyczną. Podobnie jak w przypadku transformacji TWW badania dotyczą pary kinematycznej ze stykiem konforemnym.

Po to, aby określić ilościowe relacje między badanymi wielkościami, wartości stopnia izotropowości Iz uzyskane w kolejnych powtórzeniach zostały

uśrednione i przedstawione w postaci wykresów w funkcji drogi tarcia. Wartości stopnia izotropowości przyjętych do badań próbek zawierały się w przedziale 7,98÷8,04%. Częstotliwość i sposób pomiarów zostały przedstawione w podrozdziale 5.2.2. Badania były prowadzone do osiągnięcia drogi tarcia wynoszącej 600 m – okresu intensywnych zmian (docierania), a pomiary dokonywane były po przebyciu drogi tarcia wynoszącej 100 m.
Na wykresach (rys. 5.23÷5.26) przedstawiono zmianę stopnia izotropowości w relacji do czynników związanych z warunkami współpracy.

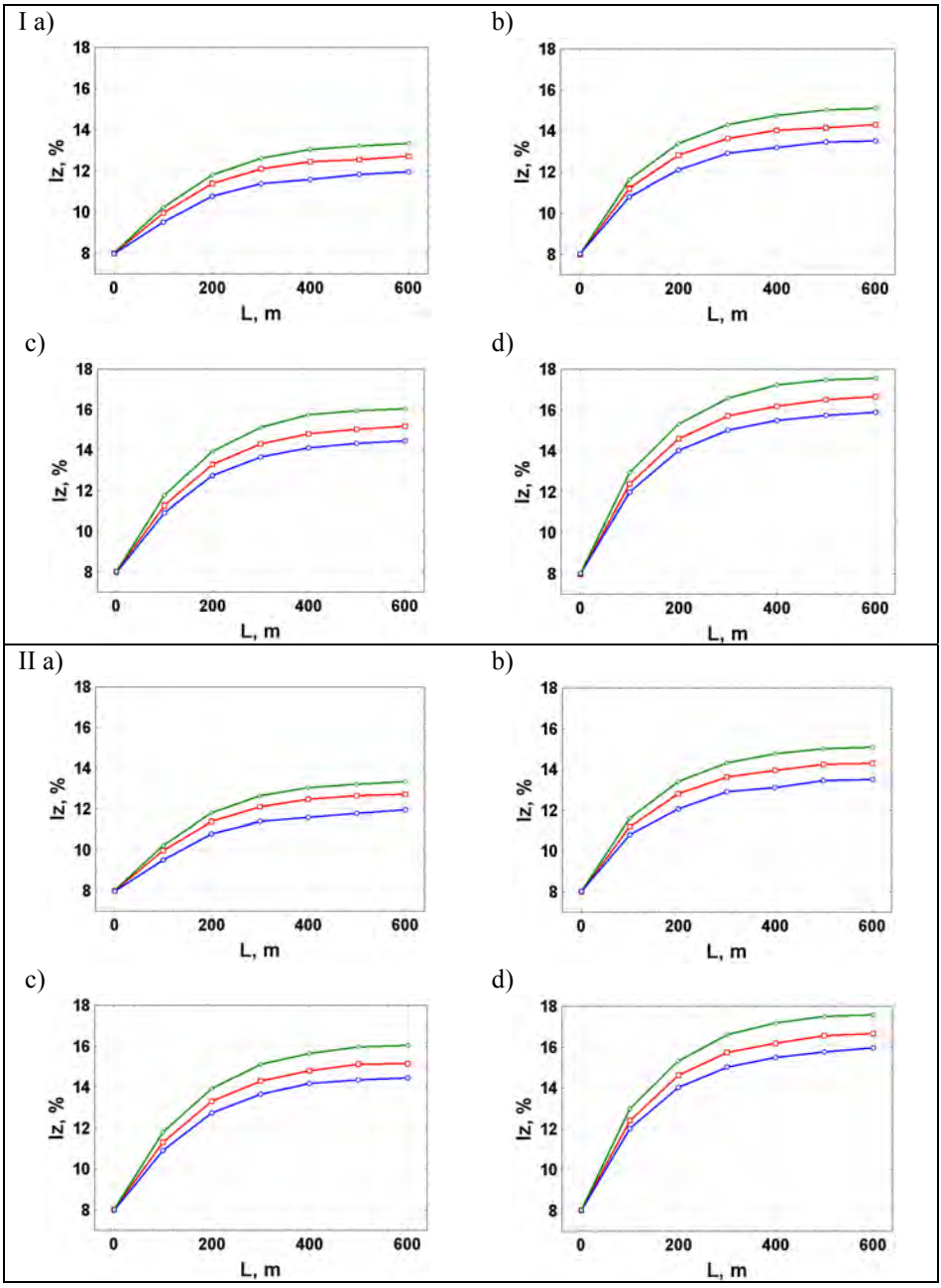
Zachodzące zmiany zostały zarejestrowane dla warunków opisanych w podrozdziale 5.2.2 i były to następujące wartości wielkości wejściowych:

- obciążenie: $F_1 = 300$ N, $F_2 = 450$ N, $F_3 = 600$ N;
- średnia prędkość ruchu względnego: $v_1 = 0{,}05$ m·s^{-1} (3 m·min^{-1}), $v_3 = 0{,}2$ m·s^{-1} (12 m·min^{-1});
- twardość tworzywa konstrukcyjnego próbek: $H_1 = 30$ HRC, $H_2 = 40$ HRC, $H_3 = 50$ HRC;
- kąt między śladami obróbki współpracujących elementów, (ukształtowanie związane z kierunkowością SGP): $\alpha_1 = 0^o$, $\alpha_2 = 30^o$, $\alpha_3 = 45^o$, $\alpha_4 = 60^o$, $\alpha_5 = 90^o$.

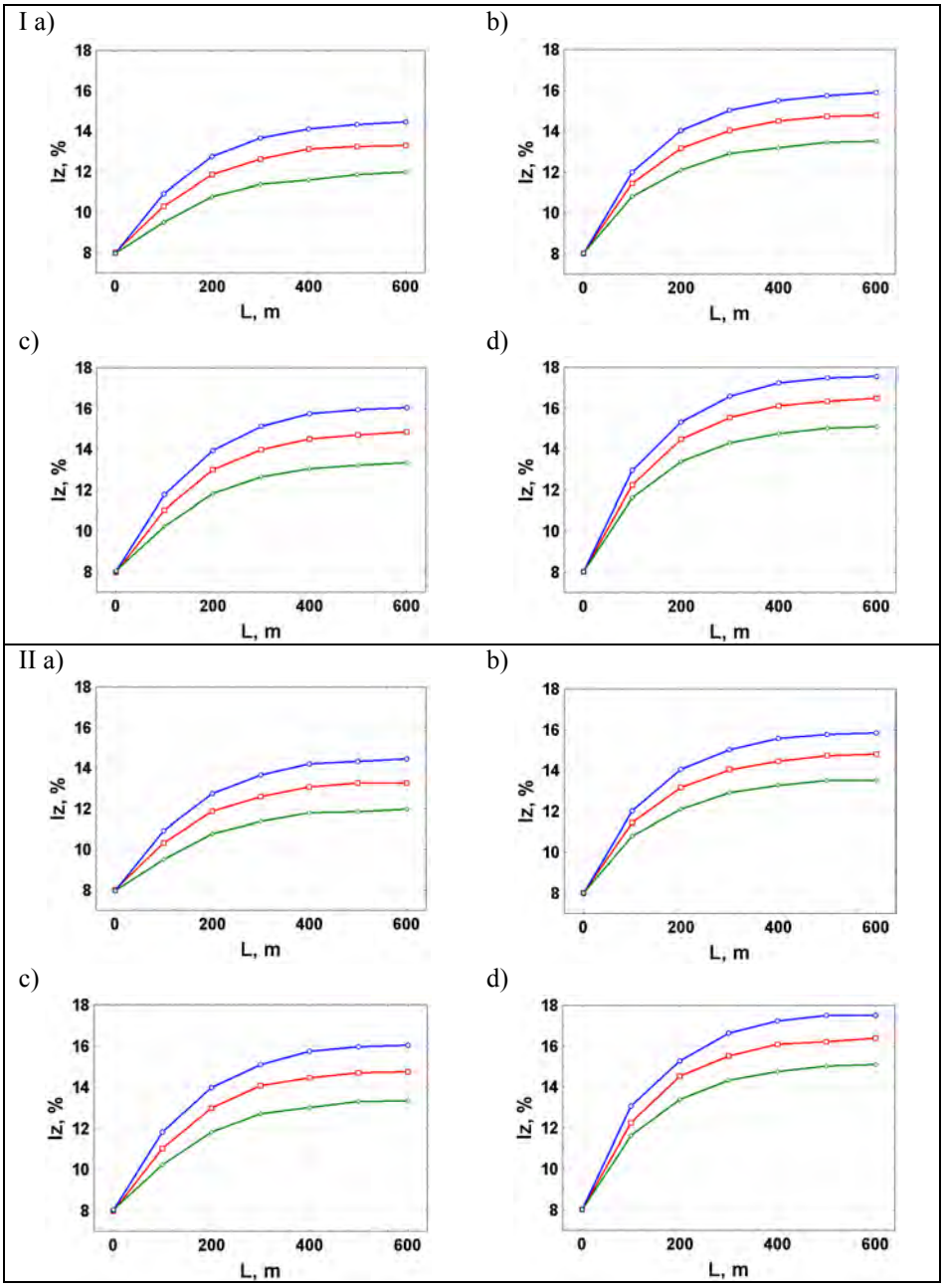
Po przeprowadzeniu badań okazało się, że spośród wszystkich wielkości niezależnych zmiana wartości średniej prędkości ruchu względnego w przyjętym modelu badawczym nie powoduje istotnych zmian w transformacji WW. Wynika to z tego, że przyjęto stałe drogi tarcia, po osiągnięciu których przerywano eksperyment i dokonywano pomiarów. Zmiana wartości prędkości z uwagi na stałość drogi tarcia wpływała jedynie na czas eksperymentu: jego skrócenie lub przyspieszenie. W celu jednoznacznego określenia wpływu prędkości ruchu należałoby przyjąć inny model badawczy, w którym zmienną kontrolowaną byłaby również temperatura, a zmiany kontrolowane byłyby po stałym czasie. W przyjętym modelu badawczym wzrost prędkości przyczyniał się zapewne do wzrostu temperatury w węźle tarcia, ale z uwagi na stałą drogę tarcia nie wpływał na zaobserwowane zmiany.

Z tych właśnie powodów nie przedstawiono wykresów dla wartości pośredniej prędkości ruchu względnego – $v_2 = 0{,}1$ m·s^{-1} (6 m·min^{-1}), ponieważ nie wnoszą one żadnych istotnych informacji do opisu relacji między czynnikami. Zarejestrowane zmiany stopnia izotropowości zaprezentowane są jedynie dla prędkości minimalnej i maksymalnej w celu potwierdzenia braku wpływu prędkości ruchu na zmiany w przyjętych warunkach badawczych.

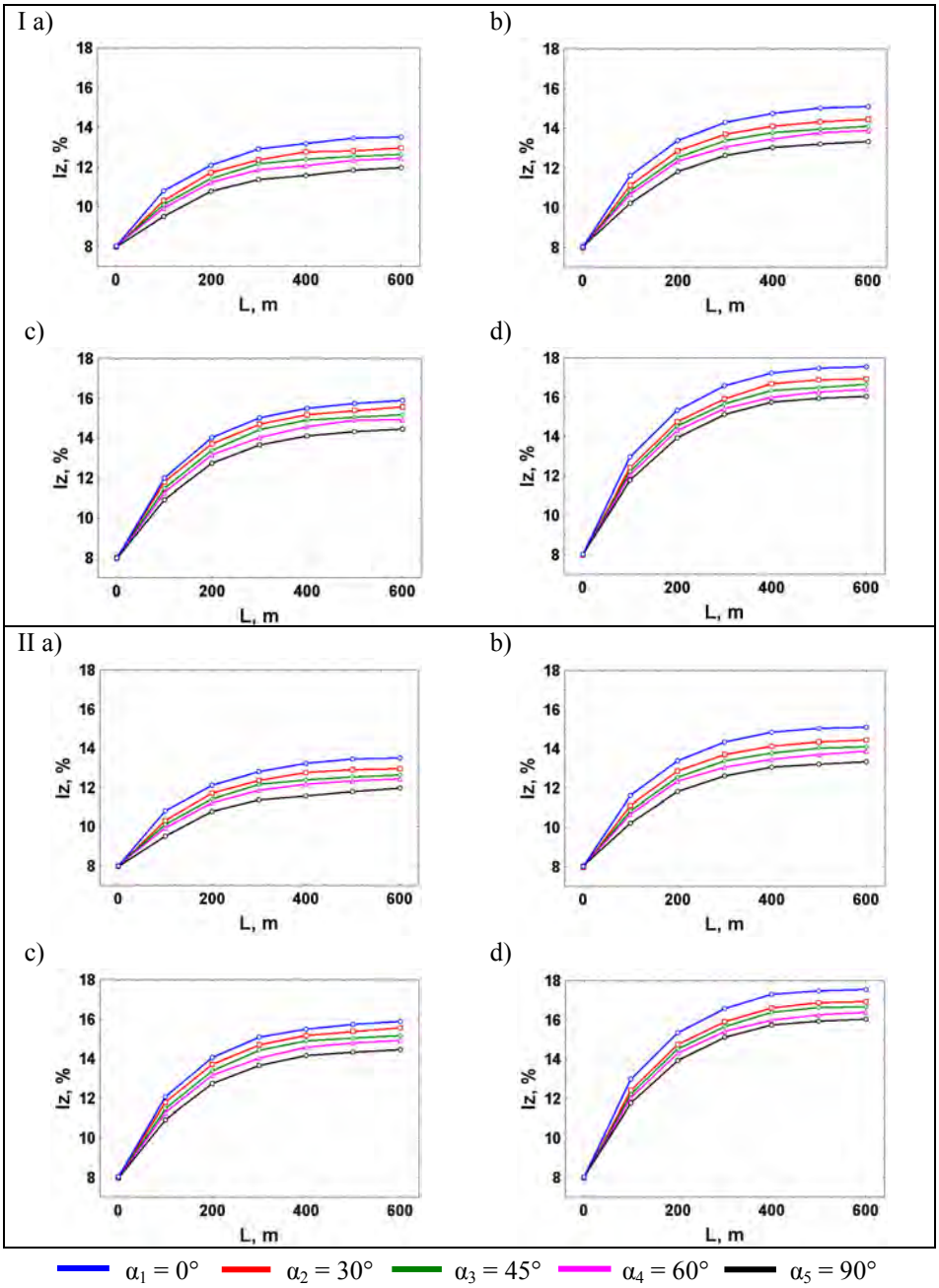
Z uwagi na liczne uzyskane wyniki, uwzględniające wszystkie kombinacje warunków współpracy, do graficznych analiz przyjęto te, które są warunkami skrajnymi, generującymi największe i najmniejsze zmiany. Dodatkowo na wykresach przedstawiono zmiany pośrednie dla wybranych kombinacji warunków współpracy. Przyjęto jedną wielkość wywołującą największe zmiany oraz drugą – generującą najmniejsze.



Rys. 5.23. Zmiana stopnia izotropowości Iz w funkcji drogi tarcia L dla różnych obciążeń przy następujących wielkościach wejściowych: I – v_1, II – v_3 oraz a) H_3 = 50 HRC i α_5 = 90°, b) H_3 = 50 HRC i α_1 = 0°, c) H_1 = 30 HRC i α_5 = 90°, d) H_1 = 30 HRC i α_1 = 0°



Rys. 5.24. Zmiana stopnia izotropowości Iz w funkcji drogi tarcia L dla różnych twardości badanych próbek przy następujących wielkościach wejściowych: I – v_1, II – v_3 oraz a) F_1 = 300 N i α_5 = 90°, b) F_1 = 300 N i α_1 = 0°, c) F_3 = 600 N i α_5 = 90°, d) F_3 = 600 N i α_1 = 0°



Rys. 5.25. Zmiana stopnia izotropowości Iz w funkcji drogi tarcia L dla różnych skojarzeń kątowych charakterystycznych śladów obróbki przy następujących wielkościach wejściowych: I – v_1, II – v_3 oraz a) F_1 = 300 N i H_3 = 50 HRC, b) F_1 = 300 N i H_1 = 30 HRC, c) F_3 = 600 N i H_3 = 50 HRC, d) F_3 = 600 N i H_1 = 30 HRC

Rozrzut wyników pomiarów stopnia izotropowości SGP dla wszystkich analizowanych przypadków nie przekraczał ±2,5%.

Na podstawie wykresów stwierdzić można, że stopień izotropowości zmienia się wraz ze wzrostem drogi tarcia. Zmiany te są również zależne od realizowanych wymuszeń i świadczą o zmianach ukształtowania struktury powierzchni w czasie eksploatacji. Wartość stopnia izotropowości zwiększa się, co można zinterpretować tak, że ukształtowanie stereometryczne struktury ulega „spłaszczeniu" i zwiększa się symetryczność tego ukształtowania. Pojedyncze wierzchołki oraz grzbiety mikronierówności ulegają częściowemu bądź całkowitemu starciu. Ślady obróbki, decydujące o uprzywilejowanych kierunkach ukształtowania, wraz ze wzrostem stopnia izotropowości ulegają zniekształceniu. Ślady obróbki (ukierunkowanie struktury) nawet przy maksymalnej wartości stopnia izotropowości – 17,5%, uzyskanej w czasie badań, nadal są oczywiście widoczne. Zobrazowane to zostanie podczas analizy jakościowej zarejestrowanych zmian.

Ogólna ocena opisu transformacji warstwy wierzchniej uwzględniającego stopień izotropowości potwierdziła przydatność wykorzystania tego parametru w analizie zachodzących zmian podczas transformacji EWW.

Rzeczywista przydatność stopnia izotropowości w opisie zmian w WW zostanie zweryfikowana podczas szczegółowych analiz relacji między badanymi czynnikami.

Na podstawie analizy zmian izotropowości dla realizowanego obciążenia (rys. 5.23) stwierdzić można, że najmniejsza siła – 300 N – wywołuje najmniejsze zmiany wartości, natomiast siła największa – 600 N – generuje największe zmiany. Siła wynosząca 450 N wywołuje zmiany pośrednie. Jest to spostrzeżenie w miarę oczywiste, gdyż przy stałej sile stycznej (ścinającej), wynikającej z napędu stanowiska, siła docisku determinuje intensywność zjawisk w strefie współpracujących powierzchni. Wynika to z faktu, że przy większym obciążeniu łatwiej dochodzi do deformacji sprężystej, a przy przekroczeniu pewnego poziomu naprężeń – do odkształceń plastycznych, co w konsekwencji powoduje większe zmiany mierzonej wielkości.

Można zaobserwować przy tym zmianę przyrostu wartości stopnia izotropowości dla poszczególnych sił w zależności od pozostałych warunków współpracy. Dla najmniejszej wartości twardości próbek (30 HRC) i kąta współpracy wynoszącego 0°, a więc warunków wywołujących największe zmiany, przyrost stopnia izotropowości dla siły największej (rys. 5.23d) w stosunku do pozostałych sił jest większy niż dla warunków generujących najmniejsze zmiany – twardość 50 HRC i kąt $\alpha_5 = 90°$ (rys. 5.23a).

W warunkach, w których obserwuje się największe zmiany, w początkowym okresie stwierdzono przyrost wartości stopnia izotropowości o większym gradiencie niż w okresie późniejszym. Zjawisko związane ze stabilizacją zmian ma natomiast charakter odwrotny. W warunkach generujących najmniejsze zmiany stabilizacja następuje szybciej niż dla warunków wywołujących największe zmiany.

Zbliżony charakter zmian stopnia izotropowości można zaobserwować na podstawie przebiegu wykresów dla wielkości wejściowej związanej z twardością próbek (rys. 5.24). Dla twardości najmniejszej – 30 HRC – zmiany wartości stopnia izotropowości są największe, natomiast dla twardości największej – 50 HRC – najmniejsze. Twardość pośrednia – 40 HRC – wywołuje również pośrednie zmiany. Wskutek zwiększania twardości ulepszona powierzchnia stawia większe opory odkształceniom plastycznym, co z kolei wpływa na ograniczenie zmian stopnia izotropowości.

W rezultacie analizy wykresów stwierdzono, że w przyjętym zakresie badanych wielkości gradient zmian stopnia izotropowości dla poszczególnych twardości rozkłada się bardziej proporcjonalnie – szczególnie jest to widoczne na rysunku 5.24II – niż dla obciążeń. Z przebiegu krzywych dla obciążeń przedstawionych na rysunkach 5.23c i d wynika, że dwukrotne zwiększenie siły nie wywołało proporcjonalnej zmiany stopnia izotropowości. Przy uwzględnieniu dodatkowo mniejszej rozpiętości zmian stopnia izotropowości niż dla twardości spostrzeżenie to jest istotne pod względem mechanizmu zachodzących zmian. Taki obraz zmian może być spowodowany tym, że wpływ obciążenia na zmiany stopnia izotropowości w tym przypadku jest uzależniony jeszcze od innych wielkości. Tymi wielkościami są twardość i kąt między śladami obróbki na współpracujących powierzchniach. Dla warunków badań, których wyniki przedstawiono na rysunkach 5.23c i d, jest to zauważalne, natomiast dla warunków z rysunków 5.23a i b – nie jest już to tak wyraźne.

Na rysunku 5.25 przedstawiono zmiany wartości stopnia izotropowości dla różnych skojarzeń kątowych wynikających z przecięcia charakterystycznego ukierunkowania nierówności na współpracujących elementach. Relacje między analizowanymi wielkościami są podobne do wyżej opisanych – wzrost stopnia izotropowości wraz ze zwiększaniem drogi tarcia, stabilizacja zmian po przebyciu określonej drogi, największe zmiany przy realizacji największego obciążenia przy najmniejszej twardości próbek i odwrotnie dla warunków przeciwnych. Analiza tych wykresów pozwala ponadto zaobserwować wpływ kąta skojarzenia kierunkowości SGP na zachodzące zmiany stopnia izotropowości. Dla kąta $\alpha_1 = 0°$ następuje największa zmiana stopnia izotropowości SGP, natomiast dla kąta $\alpha_5 = 90°$ zmiana ta jest najmniejsza. Zmiany izotropowości dla kątów pośrednich, tj. $\alpha_2 = 30°$, $\alpha_3 = 45°$ i $\alpha_4 = 60°$, zawsze zawierają się pomiędzy wartościami tego parametru dla kątów skrajnych α_1 i α_5. Charakter zmian jest taki, iż stopień izotropowości maleje wraz ze wzrostem kąta, a ekstrema funkcji opisujących te zmiany występują na krańcach przedziału.

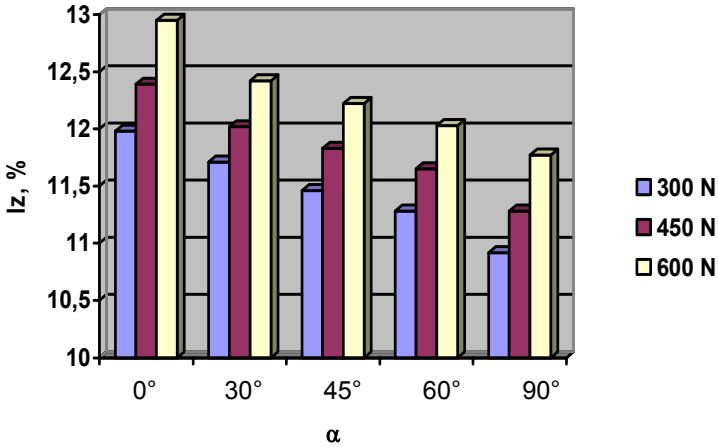
Tłumaczyć to można tym, że przy kącie $\alpha_1 = 0°$, gdy ślady obróbki są równoległe, mikronierówności „zaczepiają się" wzajemnie i wówczas opory ruchu są największe, natomiast przy kącie $\alpha_5 = 90º$ (ślady są wzajemnie prostopadłe) współpracujące powierzchnie przesuwają się po wierzchołkach i opory ruchu są najmniejsze. Dodatkowo, gdy powierzchnie współpracują przy kącie $\alpha_1 = 0º$, rozprowadzanie smaru jest utrudnione, co potęguje opory ruchu. Wraz

ze wzrostem kąta α zwiększają się możliwości swobodniejszego przepływu środka smarującego oraz warunki do jego magazynowania w bruzdach, więc opory ruchu w strefie styku zmniejszają się, powodując mniejsze zmiany w warstwie wierzchniej.

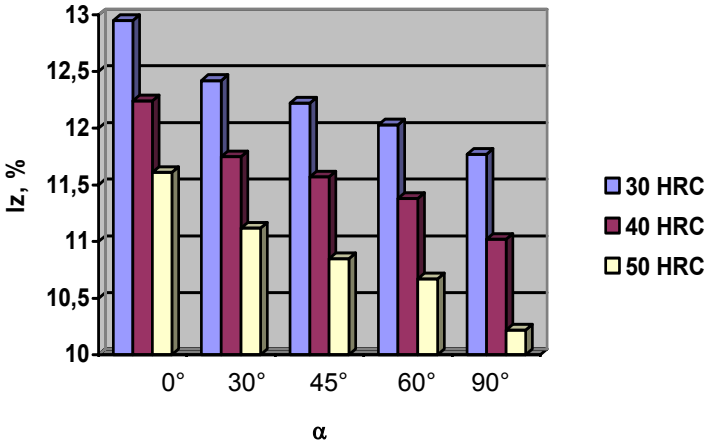
Przedstawione wszystkie wykresy potwierdziły, że zmiany względnej prędkości ruchu przy niezmiennych pozostałych wielkościach determinujących warunki współpracy nie powodują różnic intensywności zmian stopnia izotropowości. Powody takiego stanu szczegółowo opisano na początku podrozdziału.

Ze względu na to, że najintensywniejsze zmiany występują na początku współpracy, na kolejnych wykresach przedstawiono zarejestrowane zmiany stopnia izotropowości dla pierwszego pomiaru – po drodze tarcia wynoszącej 100 m. Zmiany na wykresach odzwierciedlają wpływ kontrolowanych warunków wejściowych na początku okresu docierania. Przedstawiono na nich relację między warunkami współpracy wynikającymi z wymuszeń zewnętrznych oraz ukształtowania struktury – kąt wynikający z kierunkowości powierzchni współpracujących elementów.

Na rysunkach 5.26 i 5.27 przedstawiono zależność badanego parametru od kąta przecięcia śladów obróbki na współpracujących powierzchniach – α, dla drogi tarcia wynoszącej L = 100 m, oraz dla H_1 = 30 HRC – przy analizowaniu obciążenia i F_3 = 600 N – przy rozpatrywaniu twardości próbek.



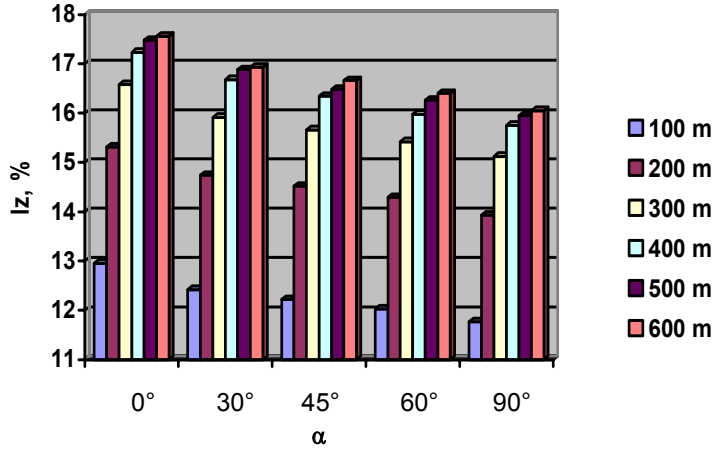
Rys. 5.26. Zmiana stopnia izotropowości dla różnych skojarzeń kątowych (α) i obciążeń (F) oraz przy: H_1 = 30 HRC i L = 100 m



Rys. 5.27. Zmiana stopnia izotropowości dla różnych skojarzeń kątowych (α) i twardości materiału próbek (H) oraz przy: F_3 = 600 N i L = 100 m

Rezultaty badań świadczą o potwierdzonej zależności zmian stopnia izotropowości od warunków współpracy: obciążenia, twardości materiału oraz kąta współpracy determinowanego ukierunkowaniem struktury. Na podstawie przedstawionych zależności stwierdzić można, że w przyjętym zakresie badawczym zmiana twardości przy danym kącie α powoduje większą rozpiętość zróżnicowania wartości stopnia izotropowości struktury niż w przypadku zmiany wartości obciążenia przy tym samym kącie α.

W celu uzyskania pełniejszego obrazu na rysunku 5.28 przedstawiono zarejestrowane zmiany stopnia izotropowości dla różnych kątów α i przy pozostałych warunkach wywołujących największe zmiany (F_3 i H_1) dla poszczególnych dróg tarcia.



Rys. 5.28. Zmiana stopnia izotropowości dla różnych skojarzeń kątowych (α) i dróg tarcia (L) oraz przy: H_1 = 30 HRC i F_3 = 600 N

Zmiany na wykresie również potwierdzają zaobserwowaną już zależność stopnia izotropowości struktury od kąta α – największe zmiany w stosunku do wartości początkowej są dla $\alpha_1 = 0^o$ i wraz ze zwiększaniem się wartości kąta gradient zmian maleje. Na podstawie wykresu można również stwierdzić, że ze wzrostem drogi tarcia maleje intensywność zmian, przy czym nie zaobserwowano istotnego wpływu kąta α na stabilizację zmian.

Na początku współpracy struktura powierzchni współpracujących elementów charakteryzuje się dużą ilością wierzchołków nierówności oraz grzbietów i dlatego w pierwszej fazie współpracy następują większe zmiany – mikronierówności ulegają ścinaniu oraz odkształceniom plastycznym. Po osiągnięciu drogi tarcia wynoszącej około 400 m, gdy największe nierówności powierzchni zostały usunięte – powierzchnia ulega dotarciu, następuje stabilizacja zmian i rozpoczyna się okres ustabilizowanej eksploatacji.

5.3.3. Relacje między stopniem izotropowości struktury powierzchni a wybranymi cechami użytkowymi warstwy wierzchniej

Wyniki badań eksperymentalnych dotyczących transformacji eksploatacyjnej warstwy wierzchniej przedstawione w tym podrozdziale dotyczą ilościowego opisu relacji między stopniem izotropowości, warunkami współpracy a czynnikami opisującymi proces zużywania elementów pary kinematycznej ze stykiem konforemnym.

Powyżej wykazano już zależność między zmianami stopnia izotropowości a intensywnością transformacji EWW. Zmiany jego wartości w funkcji warunków współpracy świadczą o zmianach w SGP współpracujących elementów. Praktyczne wykorzystanie tej zależności tylko na podstawie zmian wartości stopnia izotropowości jest jednak ograniczone. Informacja ta będzie przydatna dopiero w skojarzeniu z parametrami określającymi cechy użytkowe elementów maszyn par kinematycznych. Będzie można wówczas wyznaczyć charakterystyki tribologiczne, wiążące parametry opisujące proces zużywania ze zmianami stopnia izotropowości oraz wielkościami determinującymi warunki współpracy. Można więc będzie wnioskować o cechach użytkowych elementów tworzących parę cierną dla konkretnych wymuszeń eksploatacyjnych.

Rzeczywista przydatność stopnia izotropowości w opisie zmian w WW w aspekcie cech użytkowych pary kinematycznej zostanie zweryfikowana podczas szczegółowych analiz poszczególnych relacji między badanymi czynnikami.

W wyniku analizy studium literaturowego, jak już wcześniej przedstawiono w modelu badawczym (podrozdział 5.2.2), do wyznaczenia charakterystyk tribologicznych wybrano bezpośrednie miary zużywania:

- parametry określające zmiany geometryczne próbek,
- zmianę masy próbek Δm (ubytek masy w porównaniu do masy początkowej próbek).

Obserwacji zmian geometrycznych dokonano w skali makro – badano zmianę wymiaru liniowego próbek Δl. Została ona uzupełniona o analizę zmian geometrycznych w skali mikro – zmianę wybranych parametrów chropowatości opisujących zmiany w SGP.

Zmiany wielkości wyjściowych, które opisują transformację warstwy wierzchniej, na wykresach przedstawione są jako zmiany tego parametru odniesione do wartości początkowych – dla drogi tarcia L = 0 (względnych zmian kontrolowanych czynników wyjściowych). Podyktowane jest to tym, że zmierzone wartości początkowe kontrolowanych wielkości się różnią i porównywanie zmian ich wartości po przebyciu określonej drogi tarcia mogłoby utrudnić właściwą interpretację wyników, szczególnie w sposób graficzny na skutek różnych wartości początkowych. Z tego powodu również początkowe wartości stopnia izotropowości, co już zasygnalizowano, zostały tak dobranez partii obrabianych próbek, aby były jak najbardziej zbliżone. Dla przypomnienia, wartości stopnia izotropowości przyjętych do badań próbek zawierały się w przedziale 7,98÷8,04%.

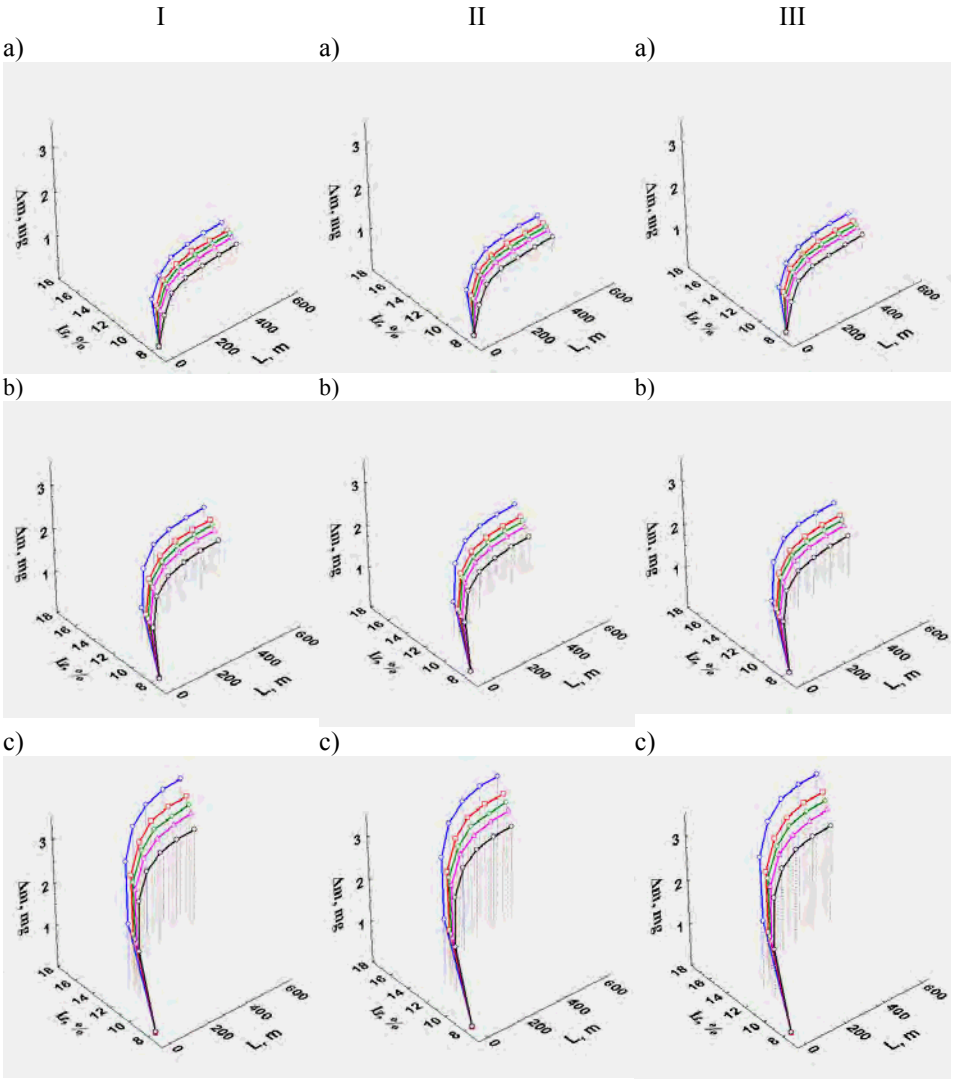
Wartości badanych wielkości uzyskanych w kolejnych powtórzeniach zostały uśrednione i przedstawione w postaci wykresów w funkcji stopnia izotropowości SGP i drogi tarcia. Częstotliwość i sposób pomiarów w tej części badawczej nie uległy zmianom i przebiegły według schematu scharakteryzowanego w podrozdziale 5.2.2. Badania były prowadzone do osiągnięcia drogi tarcia wynoszącej 600 m – okresu intensywnych zmian (docierania), a pomiary dokonywane były po drogach tarcia wynoszących 100 m.

Na wykresach – rysunek 5.29 – zaprezentowano relacje między zmianami ukształtowania SGP (stopień izotropowości) a ubytkiem masy próbek. Na wykresach – rysunki 5.30÷5.33 – przedstawiono z kolei zmiany parametrów geometrycznych próbek w zależności m.in. od stopnia izotropwości SGP, przy czym wykresy na rysunku 5.30 dotyczą zmian cech makrogeometrycznych, a na rysunkach 5.31÷5.33 – mikrogeometrycznych.

Warunki obserwacji były zgodne z przyjętym modelem badawczym, zaprezentowanym w podrozdziale 5.2.2. Zbiór tych wielkości i ich wartości był następujący:

- obciążenie: $F_1 = 300$ N, $F_2 = 450$ N, $F_3 = 600$ N;
- średnia prędkość ruchu względnego: $v_1 = 0{,}05$ m·s^{-1} (3 m·min^{-1}), $v_3 = 0{,}2$ m·s^{-1} (12 m·min^{-1});
- twardość tworzywa konstrukcyjnego próbek: $H_1 = 30$ HRC, $H_2 = 40$ HRC, $H_3 = 50$ HRC;
- stopień izotropowości ustalony dla poszczególnych warunków współpracy na podstawie przeprowadzonych badań zawierał się w przedziale 7,95÷17,5%,
- kąt między śladami obróbki współpracujących elementów (ukształtowanie związane z kierunkowością SGP): $\alpha_1 = 0^o$, $\alpha_2 = 30^o$, $\alpha_3 = 45^o$, $\alpha_4 = 60^o$, $\alpha_5 = 90^o$.

Zmiany przedstawione graficznie w tym podrozdziale z uwagi na to, że dotyczą zasadniczego aspektu monografii, zostały zilustrowane dla większości realizowanych czynników wejściowych w celu przedstawienia charakteru zmian. Dla ubytku masy przedstawiono zmiany wszystkich realizowanych wielkości wejściowych, natomiast zmiany wymiaru liniowego ze względu na teoretyczną zależność od ubytku masy (ubytek objętościowy przy określonej powierzchni próbek) zilustrowano tylko dla jednej wartości prędkości. Przy prezentacji zmian cech mikrogeometrycznych (parametrów chropowatości) pominięto wartość środkową prędkości ruchu względnego z uwagi na stwierdzony już wcześniej brak wpływu prędkości na transformację WW w przyjętych warunkach badawczych. Dodatkowo z uwagi na stwierdzony w poprzednich analizach wpływ poszczególnych wielkości opisujących warunki współpracy wyniki zostały odpowiednio pogrupowane. Na rysunkach oznaczonych symbolem a przedstawione są zmiany dla wartości wielkości generujących najmniejsze zmiany, czyli najmniejszego obciążenia i największej twardości. Na rysunkach oznaczonych symbolem c zaprezentowano zmiany dla największego obciążenia i najmniejszej twardości, czyli gdy są one największe. Rysunki b stanowią zestawienie wartości pośrednich, wywołujących również pośrednie zmiany.



Rys. 5.29. Relacje między ubytkiem masy próbek Δm a stopniem izotropowości Iz oraz drogą tarcia L dla różnych skojarzeń kątowych charakterystycznych śladów obróbki przy następujących wielkościach wejściowych: I – v_1, II – v_2, III – v_3; a) F_1 = 300 N i H_3 = 50 HRC, b) F_2 = 450 N i H_2 = 40 HRC, c) F_3 = 600 N i H_1 = 30 HRC

Rozrzut interpretowanych wyników badanej wielkości dla wszystkich analizowanych wielkości wejściowych mieścił się w przedziale ±2,5%.

Z przeprowadzonych badań wynika, że zmiana masy (Δm) zależy od warunków współpracy oraz stopnia izotropowości SGP.

Na podstawie wykresów stwierdzić można, że dla kąta $\alpha_1 = 0°$ następuje największy ubytek masy w odniesieniu do masy początkowej próbki, a towarzyszy temu również najintensywniejszy przyrost stopnia izotropowości SGP. Dla kąta $\alpha_5 = 90°$ zmiany te są odwrotne – ubytek masy jest najmniejszy przy najmniejszych zmianach stopnia izotropowości. Zmiany badanych parametrów – Iz i Δm dla kątów pośrednich, tj. $\alpha_2 = 30°$, $\alpha_3 = 45°$ i $\alpha_4 = 60°$, zawsze zawierają się pomiędzy wartościami tych parametrów dla kątów skrajnych α_1 i α_5. Charakter tych zmian jest taki, że ze wzrostem kąta α maleje zarówno zmiana masy, jak i stopnia izotropowości.

Taki przebieg zmian można uzasadnić podobnie jak w przypadku interpretacji przedstawionej w podrozdziale 5.3.2. Przy kącie przecięcia śladów obróbki na współpracujących powierzchniach – 0º opory ruchu są największe i występują najmniej korzystne warunki rozprowadzania smaru, co wpływa na największe zmiany ukształtowania struktury i objawia się najbardziej zintensyfikowanymi zmianami izotropowości SGP oraz masy. W przypadku kąta 90º sytuacja jest odwrotna: występują korzystne warunki smarowania i w związku z tym małe opory, a w rezultacie zmniejszenie kontrolowanych zmian badanych wielkości.

Takie zmiany kontrolowanych parametrów, uzależnionych od wartości kąta α, zaobserwować można dla wszystkich realizowanych w modelu badawczym obciążeń oraz twardości. Zauważyć jednak można, że wraz ze wzrostem siły zmiany masy próbek i stopnia izotropowości ich struktur ulegają intensyfikacji, natomiast ze wzrostem twardości – się zmniejszają. Tłumaczyć spostrzeżenia również można podobnie – większe obciążenie to większe deformacje plastyczne, natomiast większa twardość to większa odporność na te deformacje. Z tego powodu wpływ obciążenia i twardości materiału próbek na wykresach został zilustrowany przy odpowiednim skojarzeniu ich wartości – rysunki a, b i c.

Z analizy wykresów wywnioskować można również, że dla realizowanego największego obciążenia i najmniejszej wartości twardości, a więc gdy zmiany są najbardziej intensywne, wpływ kątów α pośrednich jest bardziej zauważalny niż dla pozostałych warunków (rys. 5.29c). Zarejestrowane zmiany w tym przypadku rozkładają się wyraźniej proporcjonalnie w badanym zakresie, w zależność od kąta współpracy.

Z przebiegu wykresów zaobserwować można również już zinterpretowany mechanizm związany ze stabilizacją zmian po przebyciu określonej drogi tarcia (ok. 400÷500 m) oraz z intensyfikacją zmian w pierwszym etapie współpracy. Dla warunków wywołujących największe zmiany odnotowano bardzo intensywny przyrost badanych wielkości po drodze tarcia wynoszącej 100 m przeciwnie do wartości stopnia izotropowości i masy próbek dla warunków wywołujących najmniejsze zmiany. Zauważyć można intensyfikację zmian stopnia izotropowości, co świadczy o dużych zmianach w ukształtowaniu struktury,

wierzchołki mikronierówności ulegają ścięciu, kierunkowość ulega zniekształceniu. Wzrost stopnia izotropowości informuje, że zwiększa się symetryczność ukształtowania, co z kolei może rzutować na dalszą transformację WW, związaną z oporami ruchu i tworzeniem się filmu olejowego.

Zmiany zarejestrowane na wykresach 5.29I, 5.29II i 5.29III uwzględniających różne prędkości ruchu względnego potwierdzają brak jej zauważalnego oddziaływania na zmiany kontrolowanych wielkości badanych. Poszczególne różnice wartości mierzonych czynników są minimalne, niezauważalne w przyjętej postaci graficznej. Z tego powodu w dalszych analizach wyników badań ograniczono graficzną interpretację dla wartości prędkości ruchu względnego.

Na wykresie 5.30 przedstawiono charakterystyki tribologiczne wiążące zmiany stopnia izotropowości z drugą przyjętą miarą zużywania – ubytkiem wymiaru liniowego w funkcji wielkości determinujących warunki współpracy.

Rozrzut pomiarów badanej wielkości dla analiz przedstawionych poniżej nie przekraczał ±3%.

Na podstawie analizy przedstawionych wykresów można stwierdzić, że zmiana wymiaru liniowego w połączeniu ze stopniem izotropowości, podobnie jak w przypadku pierwszej miary zużywania – ubytku masy próbek, również dobrze opisuje zmiany w warstwie wierzchniej współpracujących elementów.

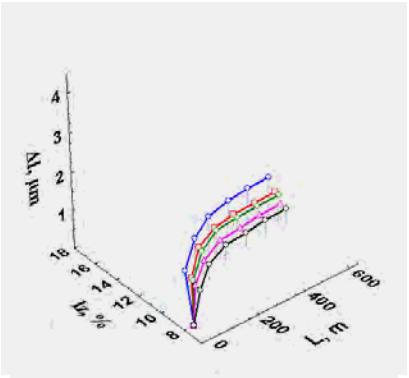
Zaobserwować można analogiczny przebieg zmian jak we wcześniej opisanych przypadkach. Dla kąta $\alpha_1 = 0°$ stwierdzono największą zmianę stopnia izotropowości i największy ubytek wymiaru liniowego, natomiast dla kąta $\alpha_5 = 90°$ – zmianę najmniejszą. Podobne przebiegi zmian generują kąty o wartościach pośrednich, tj. $\alpha_2 = 30°$, $\alpha_3 = 45°$ i $\alpha_4 = 60°$. Zawsze zawierają się one pomiędzy zmianami dla kątów α_1 i α_5, a charakter tych zmian jest taki, iż ze wzrostem kąta ubytek wymiaru liniowego jest mniejszy.

Można również stwierdzić analogiczny wpływ pozostałych czynników wejściowych: obciążenia, twardości i prędkości ruchu względnego na ubytki masy w połączeniu ze zmianą stopnia izotropowości przy uwzględnieniu kąta przecięcia śladów obróbki. Z tych względów również dalsze spostrzeżenia i interpretacje zostaną ograniczone tylko do nowych informacji.

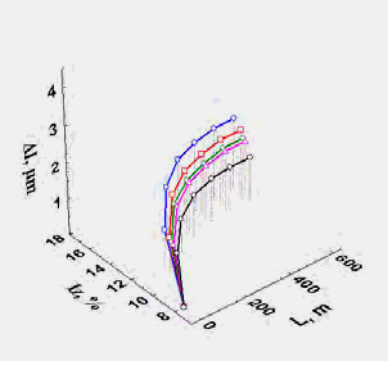
Analiza przedstawionych wykresów umożliwia stwierdzenie zróżnicowanego wpływu poszczególnych kątów przecięcia kierunkowości α na rejestrowane zmiany. Przy realizowanym największym obciążeniu i najmniejszej wartości twardości, a więc gdy zmiany są najbardziej intensywne, wpływ kątów α pośrednich jest bardziej zauważalny (rys. 5.30c), natomiast dla pozostałych warunków wpływ kątów pośrednich się zaciera. Dla warunków generujących najmniejsze zmiany wpływ kątów $\alpha_2 = 30^o$ i $\alpha_3 = 45^o$ jest bardzo zbliżony (rys. 5.30a), natomiast dla warunków pośrednich (rys. 5.30b) zmiany są zbliżone dla kątów $\alpha_3 = 45^o$ i $\alpha_4 = 60^o$. Wywnioskować z tego można, że mechanika styku ze względu na skrzyżowanie charakterystycznego ukształtowania ma wpływ na zachodzące zmiany.

Z tego powodu można stwierdzić, że spośród przyjętych bezpośrednich miar zużywania ubytek masy w relacji do stopnia izotropowości jest miarą lepiej opisującą transformację warstwy wierzchniej.

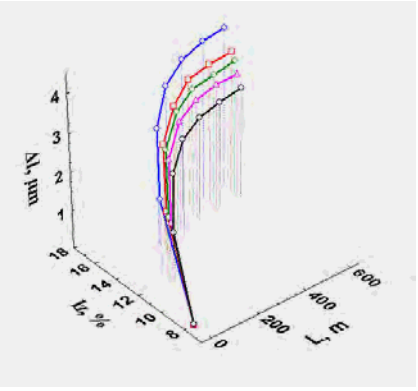
a)



b)



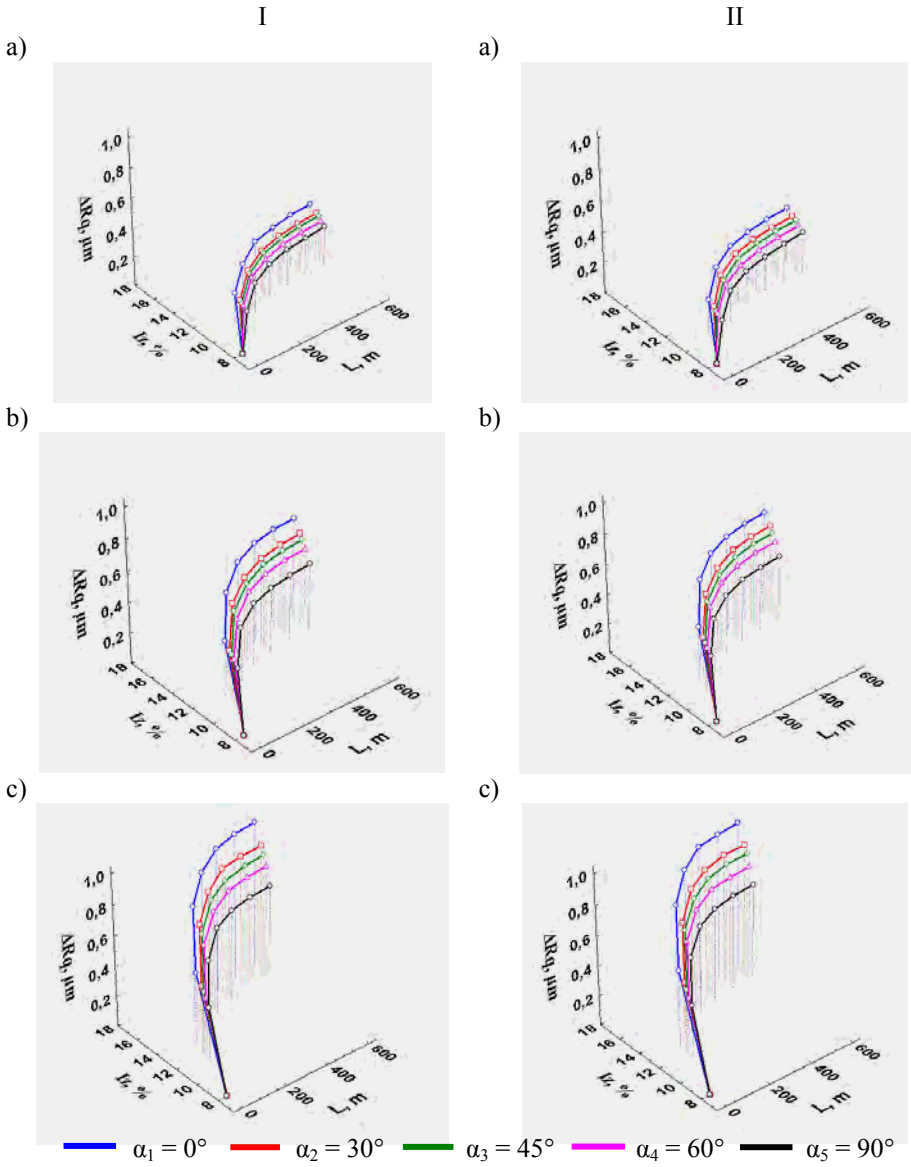
c)



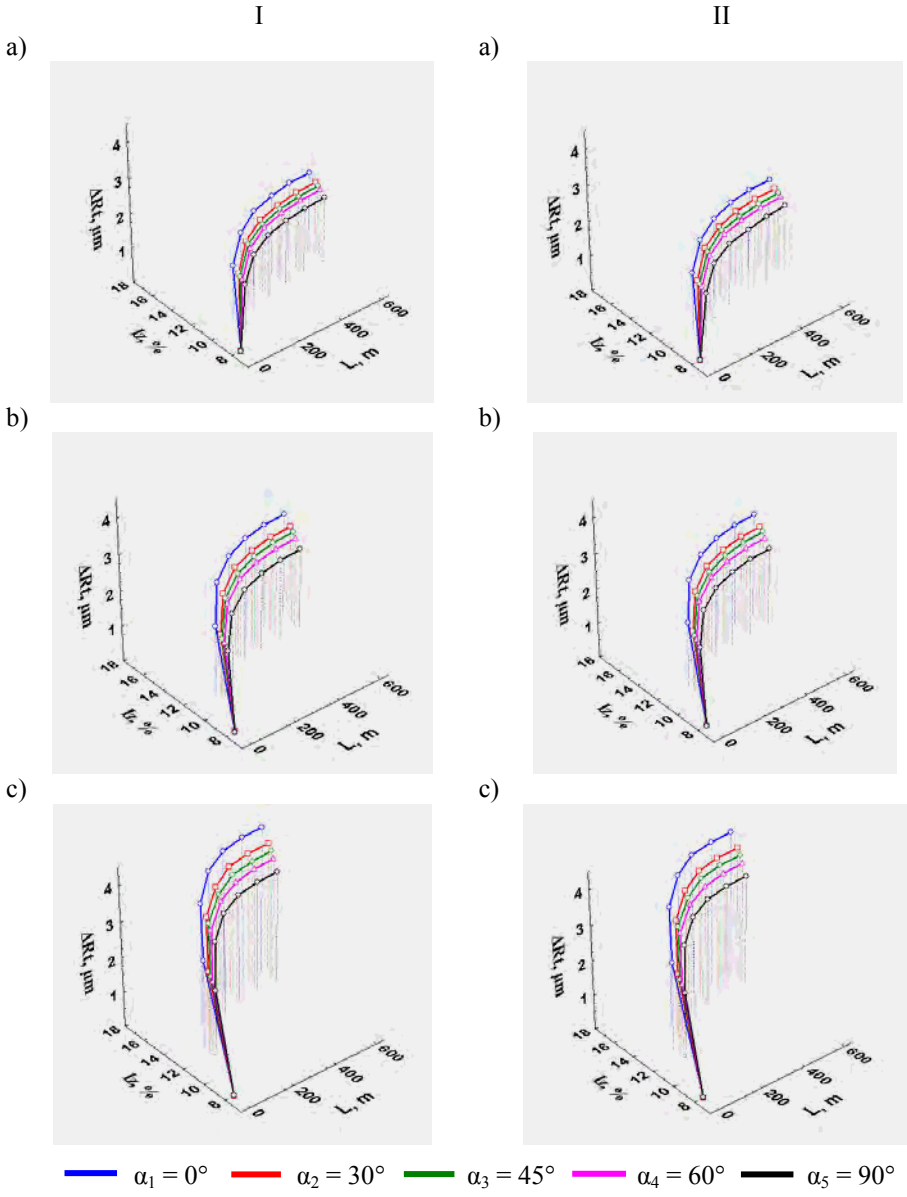
$\alpha_1 = 0°$ $\alpha_2 = 30°$ $\alpha_3 = 45°$ $\alpha_4 = 60°$ $\alpha_5 = 90°$

Rys. 5.30. Relacje między zmianą (ubytkiem) wymiaru liniowego próbek Δl a stopniem izotropowości Iz oraz drogą tarcia L dla v_1 i różnych skojarzeń kątowych charakterystycznych śladów obróbki przy następujących wielkościach wejściowych: a) $F_1 = 300$ N i $H_3 = 50$ HRC, b) $F_2 = 450$ N i $H_2 = 40$ HRC, c) $F_3 = 600$ N i $H_1 = 30$ HRC

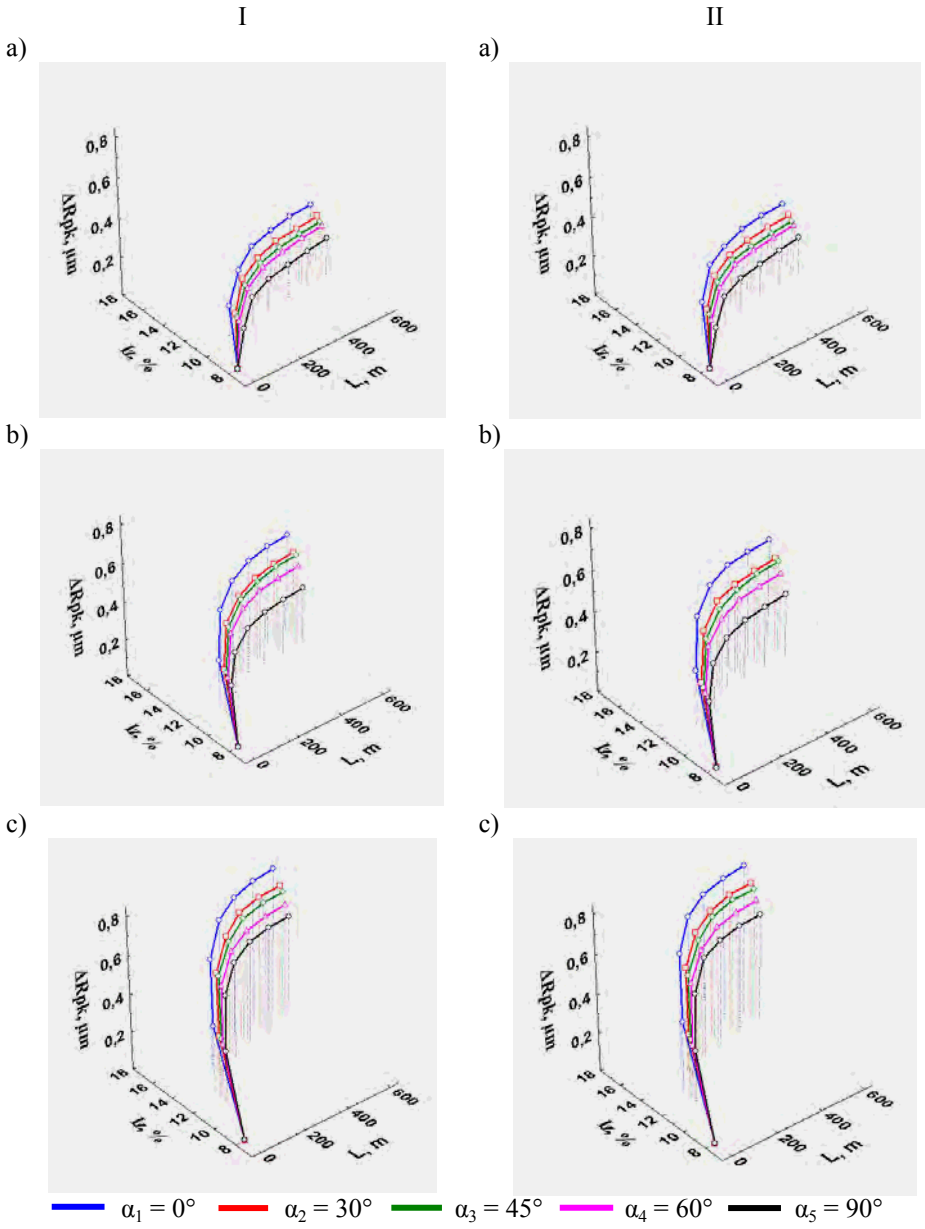
Na rysunkach 5.31÷5.33 przedstawiono charakterystyki tribologiczne wiążące zmiany stopnia izotropowości, parametrów opisujących zmiany w SGP w skali mikro – parametrów chropowatości z wielkościami determinującymi warunki współpracy.



Rys. 5.31. Relacje między zmianą wartości parametru chropowatości ΔRq w stosunku do wartości początkowej a stopniem izotropowości Iz oraz drogą tarcia L dla różnych skojarzeń kątowych charakterystycznych śladów obróbki przy następujących wielkościach wejściowych: I – v_1, II – v_3; a) F_1 = 300 N i H_3 = 50 HRC, b) F_2 = 450 N i H_2 = 40 HRC, c) F_3 = 600 N i H_1 = 30 HRC



Rys. 5.32. Relacje między zmianą wartości parametru chropowatości ΔRt w stosunku do wartości początkowej a stopniem izotropowości Iz oraz drogą tarcia L dla różnych skojarzeń kątowych charakterystycznych śladów obróbki przy następujących wielkościach wejściowych: I – v_1, II – v_3; a) F_1 = 300 N i H_3 = 50 HRC, b) F_2 = 450 N i H_2 = 40 HRC, c) F_3 = 600 N i H_1 = 30 HRC



Rys. 5.33. Relacje między zmianą wartości parametru chropowatości ΔRpk w stosunku do wartości początkowej a stopniem izotropowości Iz oraz drogą tarcia L dla różnych skojarzeń kątowych charakterystycznych śladów obróbki przy następujących wielkościach wejściowych: I – v_1, II – v_3; a) F_1 = 300 N i H_3 = 50 HRC, b) F_2 = 450 N i H_2 = 40 HRC, c) F_3 = 600 N i H_1 = 30 HRC

Do ilościowej oceny transformacji warstwy wierzchniej w skali mikro wybrano parametry chropowatości związane z parametrami amplitudowymi Rq i Rt oraz z parametrem charakteryzującym krzywą nośności Rpk. Uzasadnienie wyboru takiego właśnie zbioru parametrów podano w podrozdziale 5.2.2.

Rozrzut wyników dla wszystkich mierzonych parametrów chropowatości mieścił się w przedziale ±2,5%.

Z zarejestrowanych zmian wszystkich analizowanych parametrów chropowatości wynika, że przebieg transformacji eksploatacyjnej warstwy wierzchniej (proces zużywania) zależy od warunków współpracy w podobny sposób jak w przypadku badań już omówionych. Z przedstawionych wszystkich wykresów określających proces zużywania wynika również możliwość opisania zachodzących zmian za pomocą stopnia izotropowości SGP.

Jak już wspomniano, wpływ poszczególnych warunków współpracy jest analogiczny do badań już scharakteryzowanych. Dla kąta skojarzenia charakterystycznych śladów obróbki na powierzchniach współpracujących elementów wpływ jest taki, że kąt $\alpha_1 = 0°$ generuje największe zmiany stopnia izotropowości i wartości parametrów Rq, Rt i Rpk w odniesieniu do początkowych wartości tych parametrów, natomiast kąt $\alpha_5 = 90°$ zmiany najmniejsze. Dla kątów pośrednich, tj. $\alpha_2 = 30°$, $\alpha_3 = 45°$ i $\alpha_4 = 60°$, zmiany izotropowości i parametrów chropowatości zawsze zawierają się pomiędzy zmianami wartości tych parametrów dla kątów α_1 i α_5. Ze wzrostem kąta wartości badanych parametrów maleją.

Przy zmianie obciążenia oraz twardości próbek charakter zmian parametrów chropowatości i stopnia izotropowości, przy uwzględnieniu kąta przecięcia śladów obróbki na powierzchniach współpracujących elementów, jest także podobny do wcześniej zaobserwowanego mechanizmu. Ze wzrostem siły wspomniane zmiany są intensywniejsze, natomiast ze wzrostem twardości obserwuje się odwrotną tendencję.

Ze względu na to, że charakter przebiegu zarejestrowanych zmian odpowiada zmianom już przedstawionym i zinterpretowanym, w dalszej analizie ograniczono spostrzeżenia i ich interpretacje do wnoszących tylko nowe informacje.

Na przedstawionych wykresach wpływ na zmiany pośrednich kątów (α_2, α_3 i α_4) przecięcia kierunkowości podczas współpracy jest bardziej zauważalny niż w przypadku analiz dla parametru makrogeometrycznego. Tłumaczyć to można tym, że zmiany ukształtowania struktury mogą mieć charakter lokalny w obszarze ich rzeczywistego styku wynikającego z wzajemnego usytuowania geometrii grzbietów kierunkowości SGP. Następują wówczas dynamiczne zmiany wierzchołków mikronierówności. Zmiany mogą również wynikać ze sposobu pomiaru i jego dokładności – w przypadku parametrów chropowatości pomiary dokonywano z większą dokładnością niż dla parametru w skali makro.

Z uwagi na zauważalny wpływ kątów pośrednich na rejestrowane zmiany można zaobserwować również, że wraz ze wzrostem twardości i zmniejszaniem obciążenia maleje wpływ kąta przecięcia śladów obróbki na zmianę badanych parametrów. Z badań wynika, że kąt współpracy ma większe znaczenie w przy-

padku powierzchni mniej utwardzonych i przy dużej wartości obciążenia niż przy powierzchniach charakteryzujących się dużą twardością i współpracujących przy małej wartości obciążenia. Zmiany w ukształtowaniu są wówczas głębsze, co można tłumaczyć zwiększoną wzajemną penetracją warstwy wierzchniej przez grzbiety śladów obróbki i w takim ujęciu kąt przecięcia śladów obróbki α może mieć wpływ na rejestrowane zmiany.

Spośród przyjętych parametrów chropowatości do opisu charakterystyk tribologicznych największą przydatność wykazał parametr amplitudowy Rq (średnia kwadratowa rzędnych profilu). Został tym samym potwierdzony wniosek z analizy literatury o dużej przydatności tego parametru do analiz naukowych ze względu na jego własności statystyczne. Szczegółowo zostało to opisane w podrozdziale 5.2.2.

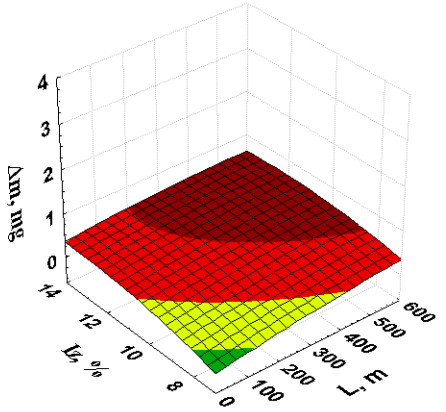
Zaobserwowane zmiany w przyjętym zakresie opisane parametrem Rq charakteryzują się dużym gradientem dla poszczególnych warunków badawczych (rys. 5.31). Możliwe jest wówczas bardziej jednoznaczne interpretowanie wpływu na intensywność transformacji EWW pośrednich wartości warunków współpracy niż dla przyjętych pozostałych parametrów chropowatości, np. w przypadku parametru krzywej nośności Rpk przebieg zmian dla poszczególnych warunków badawczych jest zbliżony (rys. 5.33). Dlatego w tym przypadku przy określaniu charakterystyki tribologicznej dodatkowy opis transformacji zmianami stopnia izotropowości może okazać się bardzo przydatny. Następuje wówczas większe różnicowanie zmian dla poszczególnych warunków współpracy.

Przedstawione na rysunku 5.34 wykresy o charakterze powierzchniowym potwierdzają stwierdzone wcześniej relacje zachodzące między parametrami istotnymi dla transformacji eksploatacyjnej warstwy wierzchniej. Wykresy dotyczą jednego kąta skojarzenia charakterystycznych śladów obróbki na powierzchniach współpracujących elementów $\alpha_1 = 0°$, przy czym stwierdzono, że dla innych kątów relacje te są jakościowo analogiczne, inny jest jedynie gradient zaobserwowanych zmian.

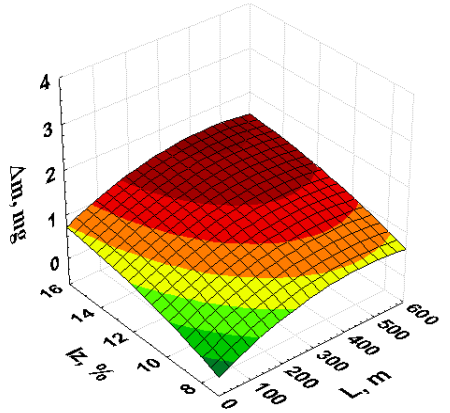
Zmiany wartości wszystkich kontrolowanych parametrów, które zostały użyte do opisu intensywności zużywania (transformacji EWW), przebiegały zgodnie z oczekiwaniami i według założonego mechanizmu zużywania.

Przedstawione analizy poszczególnych relacji potwierdziły wpływ stopnia izotropowości na transformację eksploatacyjnej warstwy wierzchniej. Zmiana stopnia izotropowości to zmiany w ukształtowaniu struktury geometrycznej powierzchni. Im większy stopień izotropowości, tym rozkład charakterystycznych elementów struktury jest bardziej losowy. Struktura ze względu na ukształtowanie staje się bardziej symetryczna, co może wpływać pozytywnie na rozprowadzanie środka smarującego, a w konsekwencji na opory ruchu.

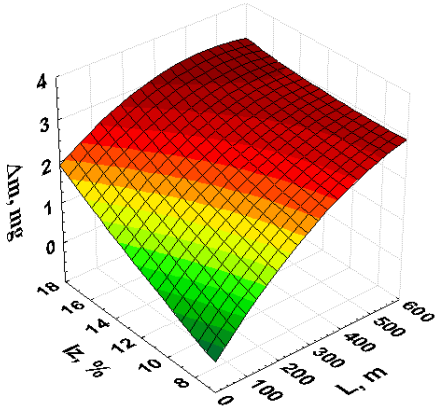
a)



b)



c)



Rys. 5.34. Relacje między ubytkiem masy próbek Δm a stopniem izotropowości Iz oraz drogą tarcia L dla v_1 i $\alpha_1 = 0°$ przy następujących wielkościach wejściowych: a) $F_1 = 300$ N i $H_3 = 50$ HRC, b) $F_2 = 450$ N i $H_2 = 40$ HRC, c) $F_3 = 600$ N i $H_1 = 30$ HRC

Wykresy ubytku masy i zmiany stopnia izotropowości w czasie transformacji EWW najlepiej spośród wszystkich przedstawionych wykresów różnicują zaobserwowane zmiany wielkości opisujących warunki współpracy, nawet tych, które generują najmniej intensywne zmiany. Ubytek masy następuje na całej powierzchni, dotyczy więc zmian w całym obszarze współpracujących powierzchni. Izotropowość struktury dotyczy również całego obszaru, nie ma charakteru lokalnego. Na tej podstawie można stwierdzić, że uzależnienie przebiegu transformacji EWW od stopnia izotropowości charakteryzującego cały potencjalny styk jest korzystne ze względu na wyznaczaną charakterystykę tribologiczną.

Największe zróżnicowanie zmian zaobserwowano również dla wielkości wejściowych wywołujących najintensywniejsze zmiany. Spowodowane to jest zapewne głębszym wzajemnym oddziaływaniem wierzchołków i grzbietów mikronierówności w obszarze ich rzeczywistego styku. Zachodzą korzystniejsze warunki do odkształceń plastycznych i destrukcji warstwy wierzchniej i w rezultacie tego następują duże zmiany ukształtowania całych współpracujących powierzchni. W takim przypadku wyznaczenie relacji między procesem zużywania a stopniem izotropowości charakteryzującym całe ukształtowanie współpracujących powierzchni wniesie informacje o charakterystyce tribologicznej, a w konsekwencji o cechach użytkowych elementów danej pary kinematycznej. Potwierdzają to wykresy dla warunków wywołujących największe zmiany (oznaczanych na wykresach jako c). Poza jednoznacznym różnicowaniem zmian wielkości charakteryzujących bezpośrednio proces zużywania zaobserwować można zawsze bardzo intensywne zmiany stopnia izotropowości.

5.4. ANALITYCZNE BADANIA IZOTROPOWOŚCI STRUKTURY POWIERZCHNI

5.4.1. Ocena jakościowa zmian struktury geometrycznej powierzchni

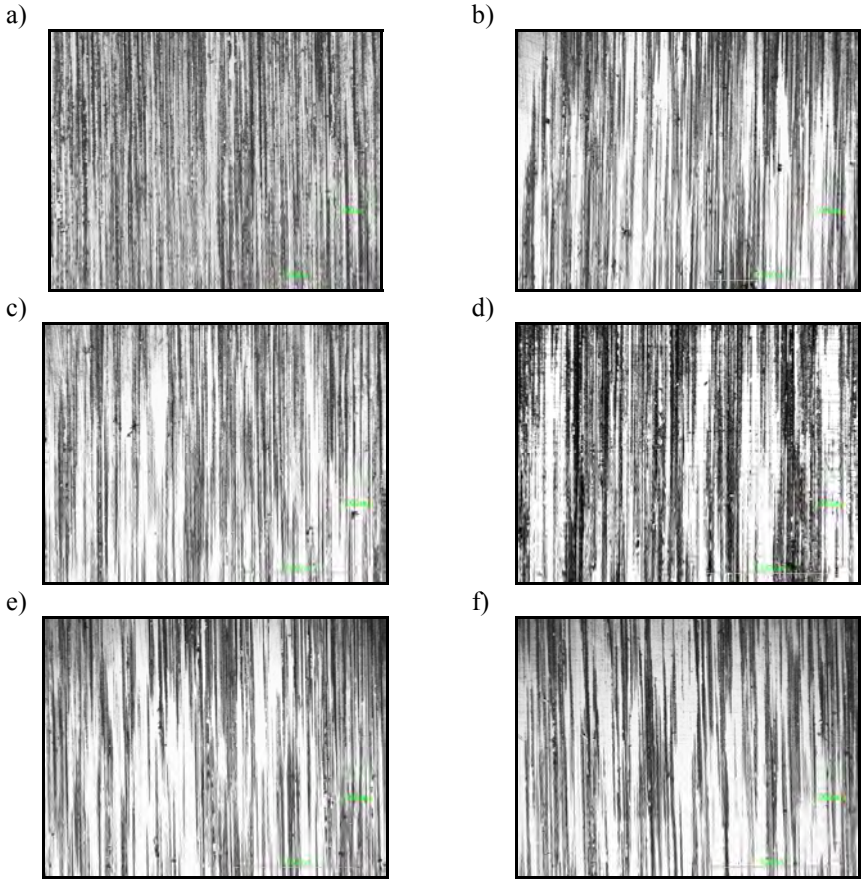
Analizy transformacji warstwy wierzchniej dokonano również z wykorzystaniem ocen jakościowych zmian w SGP. Przeprowadzono ją na podstawie obrazów badanych powierzchni oraz wykresów stopnia izotropowości oraz funkcji, na podstawie której go wyznaczano, czyli autokorelacji oraz gęstości widmowej mocy.

Polska norma [254] oraz informacje literaturowe [85, 219] zalecają, aby ocenę stanu warstwy wierzchniej opracowywać także na podstawie obrazów badanej powierzchni. Powinny one być tak wykonane, aby możliwe było dokonanie jakościowej oceny ogólnych cech SGP (chropowatości i kierunkowości). Widoczne i możliwe do zidentyfikowania powinny być także ślady zużycia i ewentualne uszkodzenia. Z uwagi na to do tej analizy przyjęto zdjęcia SGP oraz symulację komputerową w układzie 2D i 3D wykonaną na podstawie pomiarów.

Analiza jakościowa zmian badanych powierzchni przedstawiona jest dla wielkości wejściowych, które wywoływały najbardziej intensywne zmiany. Wartości tych wielkości są następujące: $F_3 = 600$ N, $\alpha_1 = 0°$, $H_1 = 30$ HRC oraz

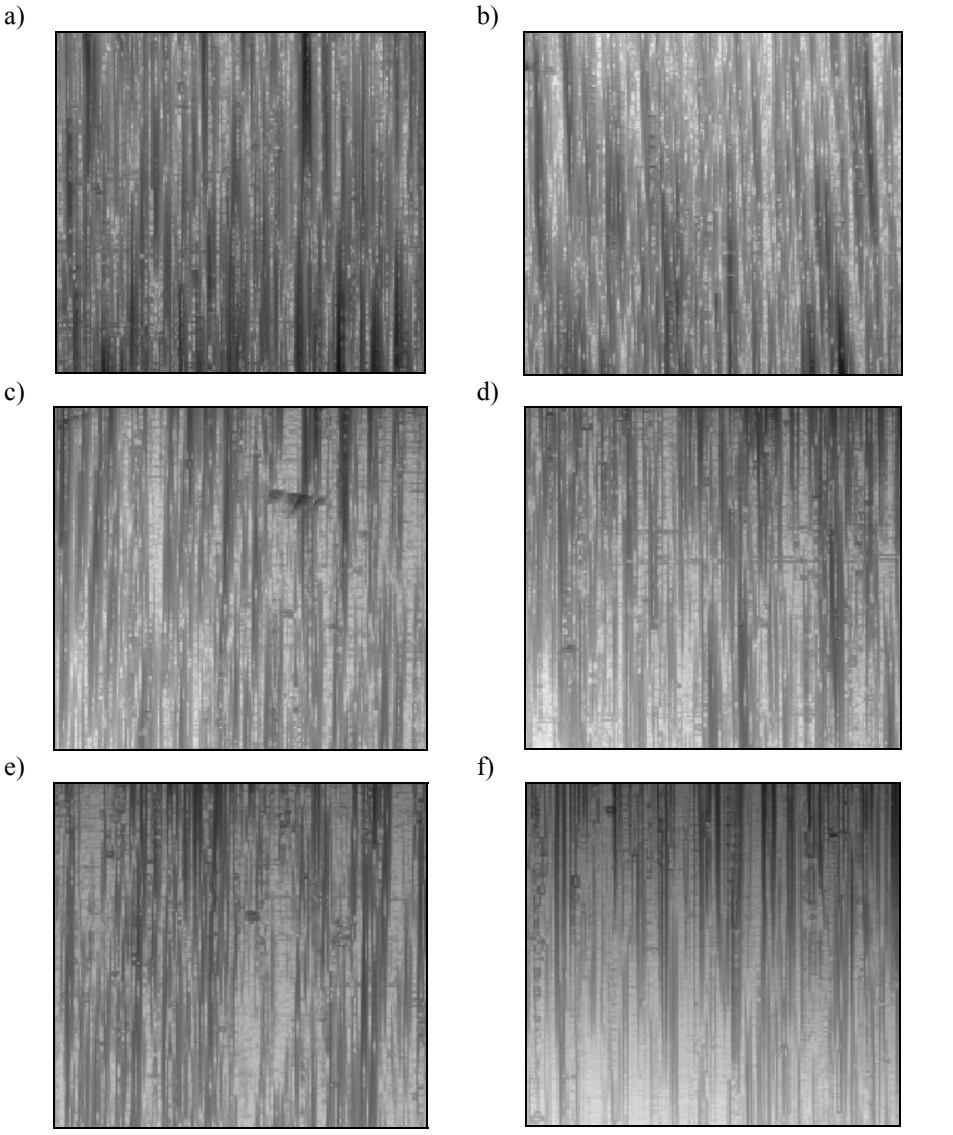
dla maksymalnej prędkości v_3 = 0,2 m·s^{-1}. Na podstawie badań zasadniczych przyjęto pięć punktów pomiarowych. Trzy odpowiadają drogom tarcia, przy których występują najbardziej intensywne zmiany i są to: 100, 200, 300 metrów. Kolejne punkty pomiarowe odpowiadają drogom tarcia wynoszącym 500 i 600 metrów, gdy w pomiarach ilościowych obserwowało się stabilizację zmian.

Na rysunku 5.35 przedstawiono fotografie SGP próbki dla wspomnianych dróg tarcia. Ze względu na to, że charakter oceny powinien uwzględniać wszystkie cechy ukształtowania SGP mające wpływ na jej izotropowość, w tym szczególnie kierunkowość struktury, obrazy badanych powierzchni próbek przedstawiono przy 90-krotnym powiększeniu. Większe powiększenie zdjęć powodowało, że ocena zmian SGP ze względu na kierunkowość SGP była trudniejsza, ponieważ obraz powierzchni badanej nie przedstawiał już jednoznacznie tej cechy struktury.



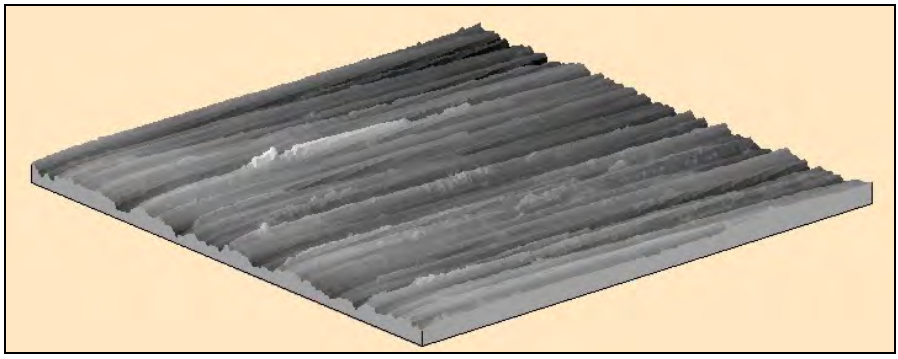
Rys. 5.35. Fotografie SGP próbek dla następujących odcinków drogi tarcia: a) 0 (przed współpracą), b) 100, c) 200, d) 300, e) 500, f) 600 metrów

W celu pełniejszego opisu zmian na podstawie fotografii SGP na rysunkach 5.36 i 5.37 przedstawiono symulację komputerową struktury na podstawie dokonanych pomiarów, odpowiednio w układzie dwu i trójwymiarowym.

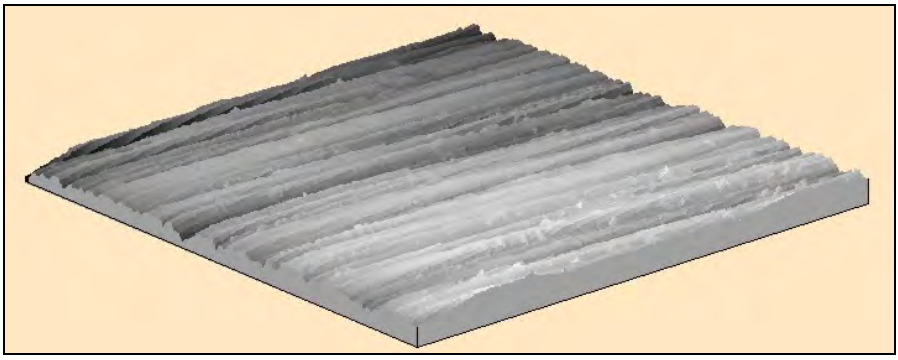


Rys. 5.36. Obrazy SGP próbek w układzie 2D uzyskanych przez symulację komputerową dla następujących odcinków drogi tarcia: a) 0 (przed współpracą), b) 100, c) 200, d) 300, e) 500, f) 600 metrów

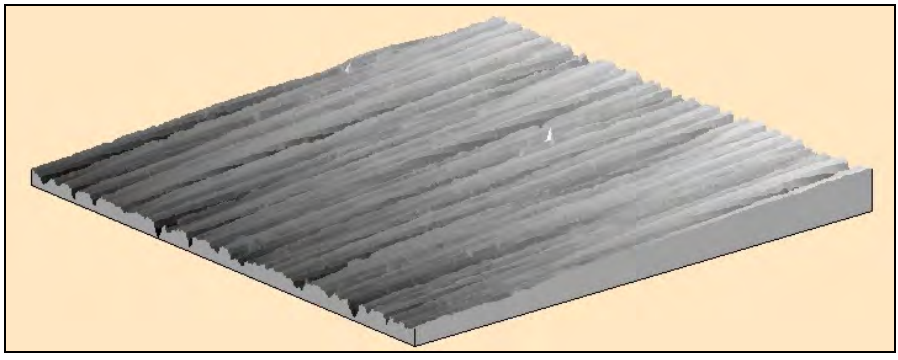
a)



b)



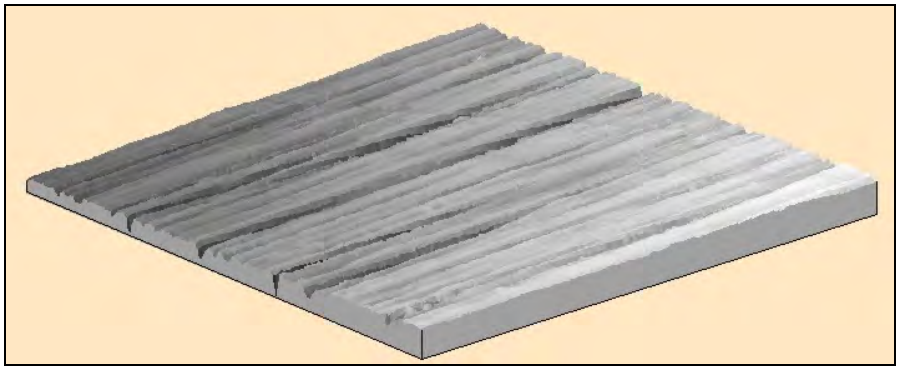
c)



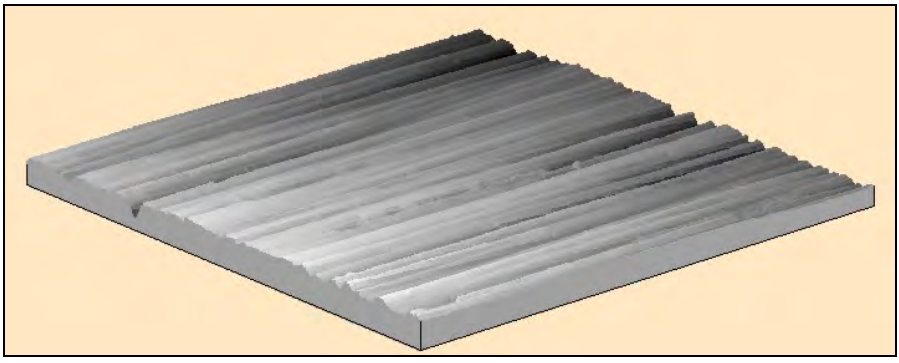
Rys. 5.37. Obrazy SGP próbek w układzie 3D uzyskanych przez symulację komputerową dla następujących odcinków drogi tarcia: a) 0 (przed współpracą), b) 100, c) 200 metrów

d)

e)



f)



Rys. 5.37. (cd.) Obrazy SGP próbek w układzie 3D uzyskanych przez symulację komputerową dla następujących odcinków drogi tarcia: d) 300, e) 500, f) 600 metrów

Na powierzchni badanej próbki (rys. 5.35a) nie zaobserwowano śladów zużywania – powierzchnia jest tylko po obróbce, bez współpracy. Na rysunkach 5.36a i 5.37a przedstawiono symulowaną powierzchnię po obróbce, również nie zauważono śladów zużywania.

Na wszystkich pozostałych rysunkach ślady zużywania można już zaobserwować – widoczne są jasne miejsca, lecz ilość tych śladów jest trudna do jednoznacznego określenia. Zauważyć można przyrost tych śladów w stosunku do stanu początkowego (po obróbce) już po drodze tarcia wynoszącej 100 m, co znajduje również odzwierciedlenie w ocenie ilościowej przedstawionej w poprzednich podrozdziałach. Zwiększanie drogi tarcia (600 m) nie powoduje wyraźnego przyrostu tych śladów, co jest potwierdzeniem stabilizacji zmian i zaniechania dalszej obserwacji zmian, która nie wnosi istotnych informacji o transformacji warstwy wierzchniej w przyjętych warunkach badawczych.

Na przedstawionych rysunkach można zaobserwować wyraźne ukierunkowanie charakterystycznych śladów obróbki. Najbardziej jest to widoczne na rysunkach przedstawiających powierzchnię bez współpracy. Na kolejnych rysunkach, w kolejnych etapach współpracy, ślady obróbki są ciągle widoczne, chociaż są już mniej kontrastowe.

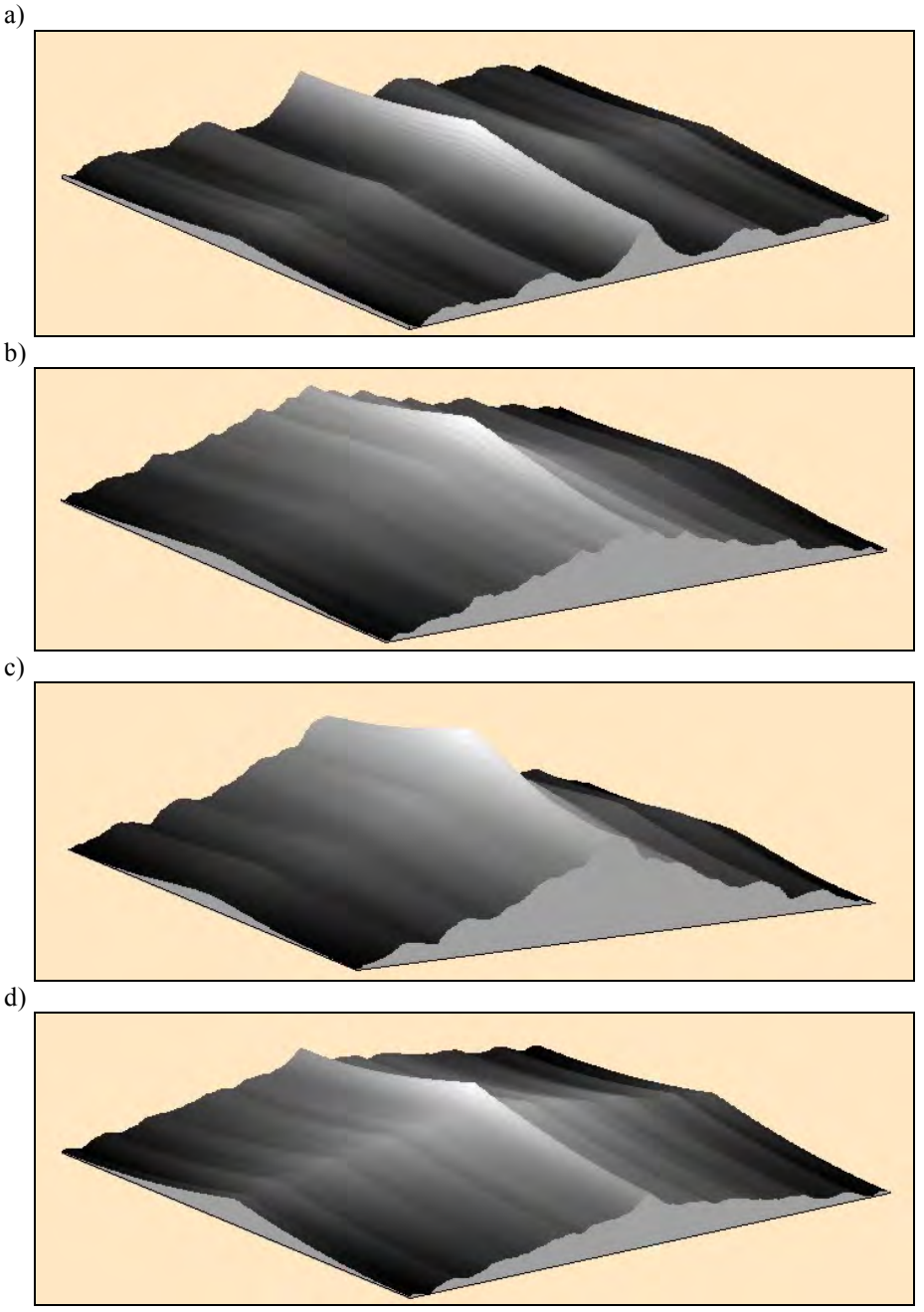
Z kolei na obrazach symulowanych można zaobserwować wyraźniejsze odwzorowanie ukształtowania niż na fotografiach, charakterystyczne elementy ukształtowania są bardziej zróżnicowane i kontrastowe. Dodatkowo na tych obrazach zauważyć można uszkodzenia czy defekty struktury geometrycznej powierzchni. W przypadku symulacji dwuwymiarowej na rysunkach 5.36c i d występują ciemne miejsca w kształcie plamki, co może świadczyć o defekcie struktury. Na rysunku 5.36d widoczne są natomiast poprzeczne rysy w stosunku do kierunkowości, co świadczy o uszkodzeniu struktury w czasie współpracy. W przypadku symulacji 3D i fotografii nie zaobserwowano uszkodzeń czy to defektów.

Z przedstawionych obrazów nie można wnioskować o zmianach chropowatości oraz ewentualnej falistości powierzchni.

Na podstawie przedstawionych obrazów badanych powierzchni można stwierdzić, że zmiany jakościowe potwierdzają spostrzeżenia dokonane w wyniku obserwacji zmian ilościowych i stanowią uzupełnienie opisu transformacji warstwy wierzchniej za pomocą parametrów ilościowych.

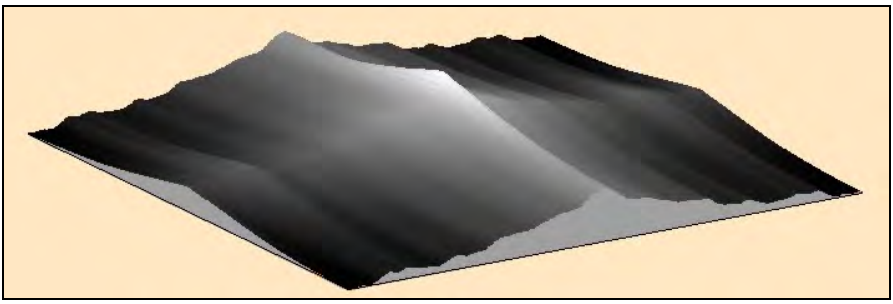
Na kolejnych rysunkach (5.38 i 5.39) przedstawiono wykresy funkcji autokorelacji oraz widmowej gęstości mocy. Na podstawie funkcji autokorelacji wyznaczano stopień izotropowości, który w postaci wykresu – róży morfologicznej – przedstawiono na rysunku 5.40.

Analiza widmowa została przeprowadzona dla tych samych powierzchni badanych próbek i tych samych warunków jak w przypadku analizowanych obrazów struktury geometrycznej powierzchni.

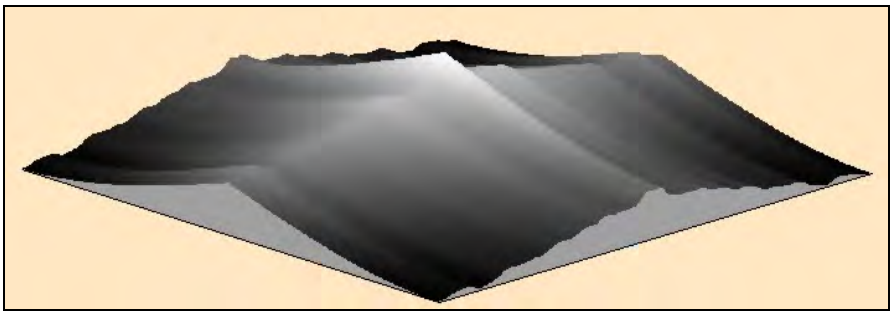


Rys. 5.38. Graficzna postać funkcji autokorelacji dla następujących odcinków drogi tarcia: a) 0 (przed współpracą), b) 100, c) 200, d) 300 metrów

e)



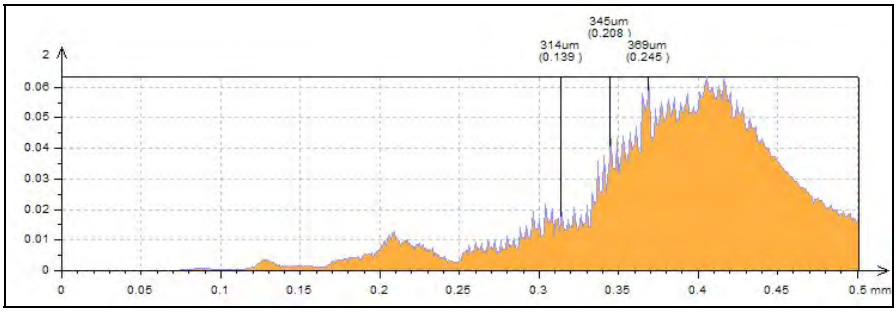
f)



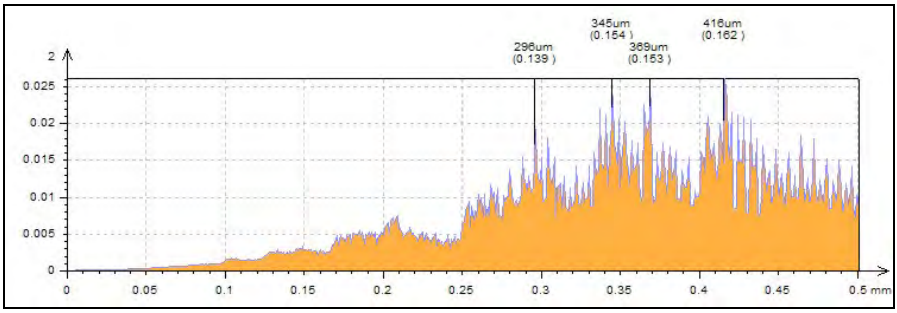
Rys. 5.38. (cd.) Graficzna postać funkcji autokorelacji dla następujących odcinków drogi tarcia: e) 500, f) 600 metrów

Przedstawione wykresy funkcji (rys. 5.38) umożliwiają zaobserwowanie jak struktura geometryczna powierzchni o charakterze anizotropowym (a) zmienia się w strukturę o charakterze mieszanym bez wyraźnie uprzywilejowanego kierunku, lecz z występującą jeszcze kierunkowością SGP (f). Nie jest widoczne jednak pełne przejście w strukturę o charakterze izotropowym z całkowitym zanikiem kierunkowości SGP. Wykres funkcji autokorelacji powierzchni obrobionej (rys. 5.38a) potwierdza anizotropowy, losowy charakter SGP o jednej składowej zdeterminowanej oraz składowych losowych, co wynika z kinematyki przyjętej obróbki.

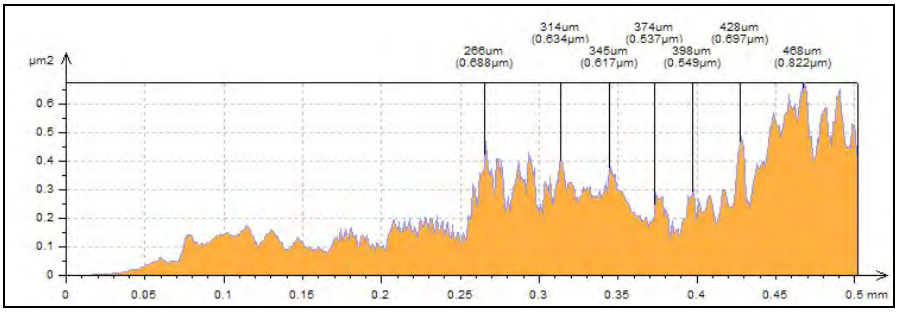
a)



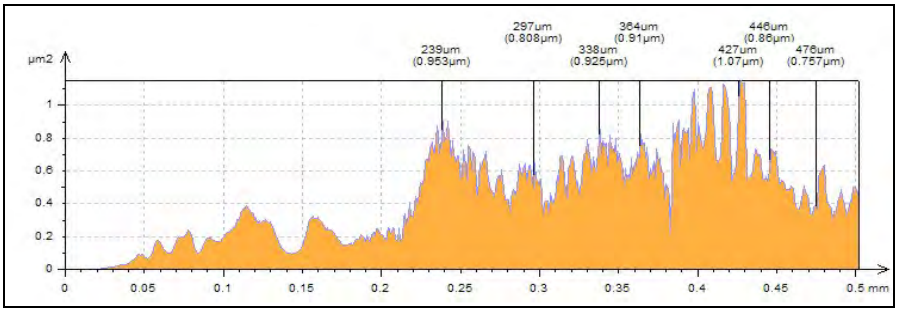
b)



c)

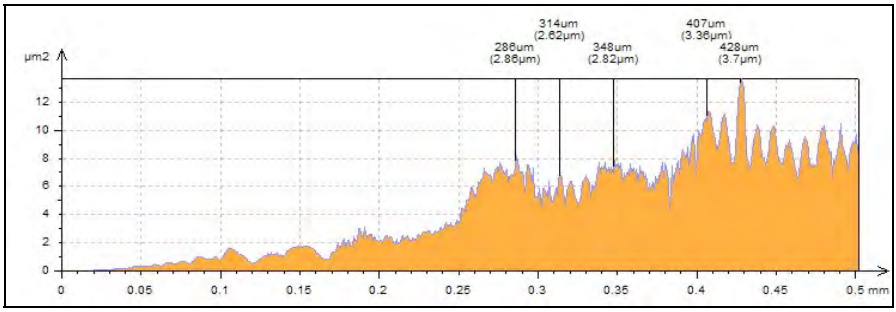


d)

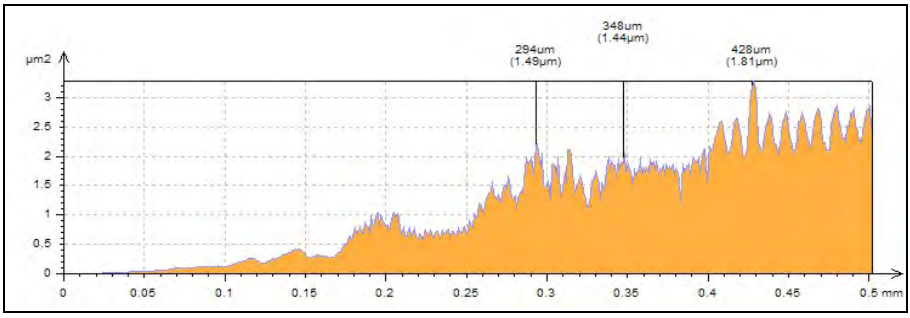


Rys. 5.39. Wykresy funkcji widmowej gęstości mocy dla następujących odcinków drogi tarcia: a) 0 (przed współpracą), b) 100, c) 200, d) 300 metrów

e)

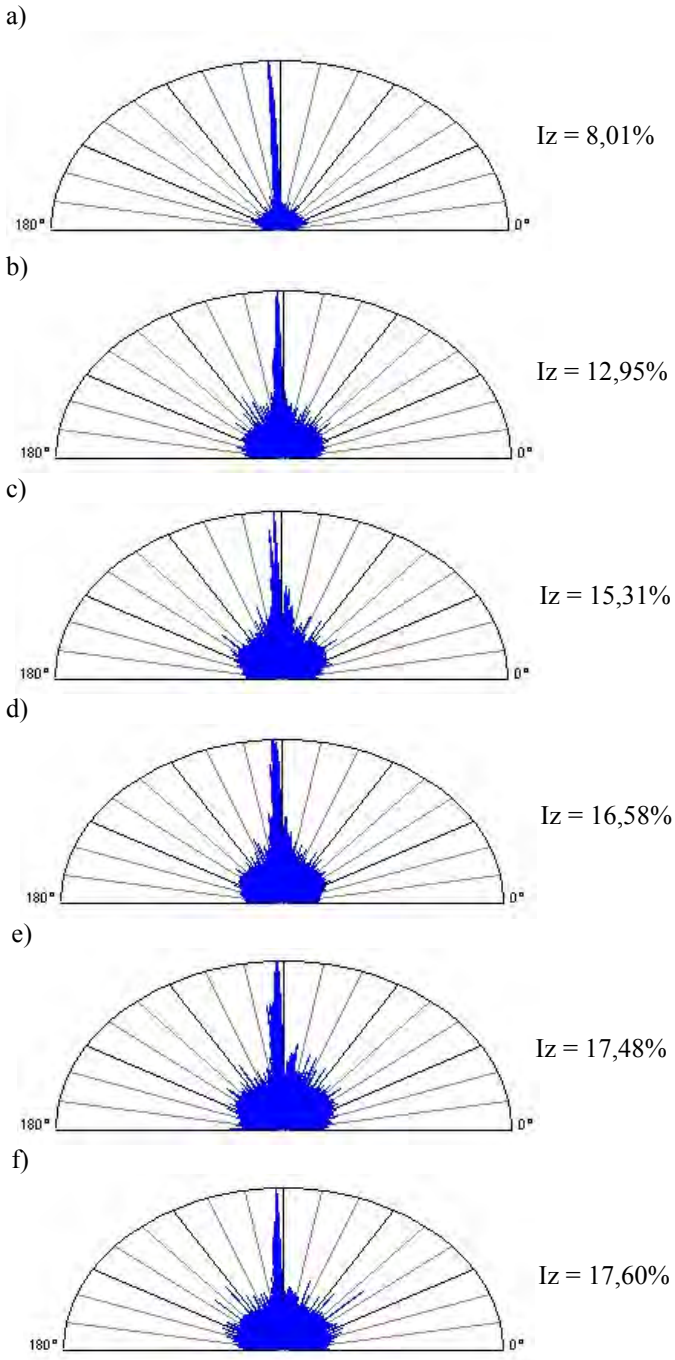


f)



Rys. 5.39. (cd.) Wykresy funkcji widmowej gęstości mocy dla następujących odcinków drogi tarcia: 500, f) 600 metrów

Na wykresach przedstawiono zmianę funkcji widmowej gęstości mocy w poszczególnych fazach współpracy. Na początku (rys. 5.39a), gdy próbka jeszcze nie współpracowała, na wykresie zaobserwować można jedną dominantę, co wynika z charakteru powierzchni (określonej kierunkowości SGP) i co się z tym wiąże – ze zdeterminowanego sposobu obróbki i przyjętych parametrów. Na pozostałych wykresach nie ma już jednej dominującej składowej, a jest to spowodowane zmianom powstałym w rezultacie współpracy powierzchni. Ślady obróbki zanikają i kierunek tych śladów nie jest już tak wyraźnie uprzywilejowany.



Rys. 5.40. Wykresy stopnia izotropowości SGP dla następujących odcinków drogi tarcia: a) 0 (przed współpracą), b) 100, c) 200, d) 300, e) 500, f) 600 metrów

Przedstawione wykresy potwierdzają wcześniejsze spostrzeżenia. Na początku badań, gdy struktura jest wyraźnie ukierunkowana, na wykresach zaobserwowano jedną dominantę (rys. 5.40a). Podczas współpracy wraz ze wzrostem drogi tarcia następują zmiany ukształtowania struktury i przebieg wykresów się zmienia. Róża kierunków na wykresach wyznacza główne kierunki ukształtowania powierzchni. Odnotowano zmniejszanie się istotności jednego dominującego kierunku.

Z wykresów wynika, że nawet po drodze tarcia wynoszącej 600 m struktura wykazuje cały czas ukierunkowanie, choć z zanikaniem jednej dominanty. Potwierdzają to również wartości liczbowe stopnia izotropowości, które nie przekraczają 20%, co przyjmuje się jako granicę struktury anizotropowej.

Przedstawiona analiza jakościowa zmian w SGP potwierdziła wnioski dokonane na podstawie obserwacji zmian ilościowych.

5.4.2. Modele predykcyjne – statystyczne opracowanie wyników badań

Podstawowym zadaniem analizy systemowej jest modelowanie i predykcja (prognozowanie) zjawisk dotyczących badanych systemów. Modelowanie odwołuje się do znanych związków przyczynowo-skutkowych, natomiast predykcja jest bezpośrednim dopasowaniem założonego typu rozwiązania do zaobserwowanych informacji. Z tego powodu w zdecydowanej większości obserwowanych zjawisk buduje się modele predykcyjne, a nie przyczynowo-skutkowe.

W przedstawionym podrozdziale do matematycznego opisu zaobserwowanych zmian zastosowano modele predykcyjne wyznaczone na podstawie regresji wielokrotnej (wielorakiej).

Modele te zostały podzielone na dwie grupy, odpowiednio do dwóch głównych części badań doświadczalnych. Pierwsza grupa dotyczy badań związanych z wyznaczeniem relacji między stopniem izotropowości SGP (zmienna zależna – skutkowa) a wielkościami determinującymi warunki współpracy elementów tworzących parę kinematyczną ze stykiem konforemnym. Druga dotyczy natomiast relacji między wielkościami determinującymi cechy użytkowe (ubytkiem masy, zmianami geometrycznymi makro i mikro) a stopniem izotropowości i wielkościami determinującymi warunki współpracy.

Z uwagi na to, że po przeprowadzeniu badań doświadczalnych stwierdzono niewielki wpływ prędkości ruchu względnego (v) w przyjętym modelu badawczym w opracowywanych matematycznie modelach predykcyjnych nie uwzględniono tego czynnika.

Dla pierwszej grupy modele te będą funkcją czterech zmiennych niezależnych (przyczynowych):

- α_i gdzie i = 0°, 30°, 45°, 60°, 90°;
- F_j gdzie j = 300 N, 450 N, 600 N;
- H_k gdzie k = 30 HRC, 40 HRC, 50 HRC;
- L_m gdzie m = 100 m, 200 m, 300 m, 400 m, 500 m, 600 m.

W drugiej grupie do zbioru zmiennych wejściowych (niezależnych) zaliczono również stopień izotropowości (Iz), wyznaczony z poszczególnych pomiarów.

Ze względu na to, że dąży się do tego, aby opracowane matematycznie modele predykcyjne z jednej strony bardzo dobrze odzwierciedlały zmiany zarejestrowane w badaniach doświadczalnych, a z drugiej były jak najprostsze, do dalszej analizy przyjęto trzy modele predykcyjne. Na podstawie analizy statystycznej i porównania wybrano model najlepiej opisujący zmiany.

Modele te są funkcją wymienionych zmiennych niezależnych (maksymalnie pięciu) i oparte są na funkcjach: liniowej (5.4), liniowej z interakcjami (5.5) oraz potęgowej (5.6), o ogólnych postaciach:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 \tag{5.4}$$

$$\begin{aligned} y = {} & a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_1x_2 + a_6x_1x_3 + a_7x_1x_4 + \\ & + a_8x_1x_5 + a_9x_2x_3 + a_9x_2x_4 + a_{10}x_2x_5 + a_{11}x_3x_4 + a_{12}x_3x_5 + a_{13}x_4x_5 \end{aligned} \tag{5.5}$$

$$y = e^a * x_1^b * x_2^c * x_3^d * x_4^c * x_5^e \tag{5.6}$$

W celu wyznaczenia zależności wielkości badanych od przyjętych czynników wejściowych estymowano współczynniki równań regresji w założonej postaci i testowano ich istotność. Ze względu na rozbudowanie opracowanych modeli na podstawie statystyki t-Studenta dla poziomu istotności testu $\alpha = 0{,}05$ w modelach uwzględniono tylko współczynniki istotne statystycznie.

Modele predykcyjne dla pierwszej grupy badanej związane z wyznaczeniem relacji między stopniem izotropowości SGP a wielkościami determinującymi warunki współpracy elementów w wyniku obliczeń przyjmują postać:

1. Model w postaci funkcji liniowej:

$$Iz = 12{,}483 - 0{,}0138\alpha_i + 0{,}0037F_j - 0{,}093H_k + 0{,}0101L_m \tag{5.7}$$

2. Model w postaci funkcji liniowej z interakcjami:

$$\begin{aligned} Iz = {} & 10{,}61939 + 15{,}085 \cdot 10^{-3} L_m - 0{,}0219 \cdot 10^{-3} \alpha_i L_m + \\ & + 7{,}5 \cdot 10^{-6} F_j L_m - 0{,}184 \cdot 10^{-3} H_k L_m \end{aligned} \tag{5.8}$$

3. Model w postaci funkcji potęgowej:

$$Iz = 10{,}1126994 \cdot \alpha_i^{-0{,}061284} \cdot F_j^{0{,}132628} \cdot H_k^{-0{,}315645} \cdot L_m^{0{,}152882} \tag{5.9}$$

Modele predykcyjne dla drugiej grupy badanej, dotyczącej relacji między wielkościami determinującymi cechy użytkowe (ubytkiem masy, zmianami geometrycznymi makro i mikro) a stopniem izotropowości i wielkościami determinującymi warunki współpracy w wyniku obliczeń przyjmują postać:

1. Modele w postaci funkcji liniowej:

$$\Delta m = 113{,}9509 \cdot 10^{-3} Iz - 4{,}09 \cdot 10^{-3} \alpha_i + 2{,}0438 \cdot 10^{-3} F_j + - 35{,}351 \cdot 10^{-3} H_k + 0{,}8484 \cdot 10^{-3} L_m \quad (5.10a)$$

$$\Delta l = 142{,}8589 \cdot 10^{-3} Iz - 5{,}207 \cdot 10^{-3} \alpha_i + 2{,}5225 \cdot 10^{-3} F_j + - 43{,}403 \cdot 10^{-3} H_k + 1{,}1133 \cdot 10^{-3} L_m \quad (5.10b)$$

$$\Delta Rq = 32{,}8213 \cdot 10^{-3} Iz - 1{,}676 \cdot 10^{-3} \alpha_i + 0{,}4775 \cdot 10^{-3} F_j + - 7{,}011 \cdot 10^{-3} H_k + 0{,}4301 \cdot 10^{-3} L_m \quad (5.10c)$$

$$\Delta Rt = 147{,}3481 \cdot 10^{-3} Iz - 5{,}605 \cdot 10^{-3} \alpha_i + 1{,}3583 \cdot 10^{-3} F_j + - 19{,}599 \cdot 10^{-3} H_k + 1{,}933 \cdot 10^{-3} L_m \quad (5.10d)$$

$$\Delta Rpk = 35{,}6084 \cdot 10^{-3} Iz - 1{,}025 \cdot 10^{-3} \alpha_i + 0{,}211 \cdot 10^{-3} F_j + - 6{,}726 \cdot 10^{-3} H_k + 0{,}2867 \cdot 10^{-3} L_m \quad (5.10e)$$

2. Modele w postaci funkcji liniowej z interakcjami:

$$\begin{aligned} \Delta m = {} & 70{,}006789 \cdot 10^{-3} Iz - 9{,}382448 \cdot 10^{-3} \alpha_i - 5{,}212964 \cdot 10^{-3} F_j + \\ & + 24{,}73378 \cdot 10^{-3} H_k + 8{,}414201 \cdot 10^{-3} L_m - 0{,}370158 \cdot 10^{-3} Iz\alpha_i + \\ & + 0{,}573604 \cdot 10^{-3} IzF_j - 3{,}927743 \cdot 10^{-3} IzH_k - 0{,}3645 \cdot 10^{-3} IzL_m + \\ & + 9{,}64243 \cdot 10^{-6} \alpha_i F_j + 0{,}200398 \cdot 10^{-3} \alpha_i H_k - 9{,}44411 \cdot 10^{-6} \alpha_i L_m + \\ & + 0{,}928842 \cdot 10^{-6} F_j L_m - 62{,}8315 \cdot 10^{-6} H_k L_m \end{aligned} \quad (5.11a)$$

$$\begin{aligned} \Delta l = {} & 78{,}849003 \cdot 10^{-3} Iz - 10{,}866336 \cdot 10^{-3} \alpha_i - 6{,}351978 \cdot 10^{-3} F_j + \\ & + 24{,}247381 \cdot 10^{-3} H_k + 7{,}858492 \cdot 10^{-3} L_m - 0{,}505351 \cdot 10^{-3} Iz\alpha_i + \\ & + 0{,}707789 \cdot 10^{-3} IzF_j - 3{,}841888 \cdot 10^{-3} IzH_k - 0{,}312002 \cdot 10^{-3} IzL_m + \\ & + 12{,}2689 \cdot 10^{-6} \alpha_i F_j + 0{,}241056 \cdot 10^{-3} \alpha_i H_k - 8{,}38608 \cdot 10^{-6} \alpha_i L_m + \\ & - 65{,}916 \cdot 10^{-6} H_k L_m \end{aligned} \quad (5.11b)$$

$$\begin{aligned}\Delta Rq = {} & 22{,}143989\cdot10^{-3}\,Iz - 1{,}096963\cdot10^{-3}\,\alpha_i - 0{,}883948\cdot10^{-3}\,F_j + \\ & - 2{,}925023\cdot10^{-3}\,H_k + 1{,}900133\cdot10^{-3}\,L_m + 77{,}7182\cdot10^{-6}\,IzF_j + \\ & - 72{,}9681\cdot10^{-6}\,IzL_m + 22{,}2099\cdot10^{-6}\,\alpha_i H_k - 2{,}79772\cdot10^{-6}\,\alpha_i L_m + \\ & + 4{,}29709\cdot10^{-6}\,F_j H_k - 15{,}912\cdot10^{-6}\,H_k L_m\end{aligned} \tag{5.11c}$$

$$\begin{aligned}\Delta Rt = {} & -82{,}702103\cdot10^{-3}\,Iz - 7{,}756831\cdot10^{-3}\,\alpha_i - 2{,}170123\cdot10^{-3}\,F_j + \\ & + 33{,}985347\cdot10^{-3}\,L_m - 0{,}425194\cdot10^{-3}\,Iz\alpha_i + 0{,}499599\cdot10^{-3}\,IzF_j + \\ & + 3{,}586921\cdot10^{-3}\,IzH_k - 1{,}67417\cdot10^{-3}\,IzL_m + 6{,}23851\cdot10^{-6}\,\alpha_i F_j + \\ & + 0{,}219371\cdot10^{-3}\,\alpha_i H_k - 30{,}5038\cdot10^{-6}\,\alpha_i L_m - 60{,}2309\cdot10^{-6}\,F_j H_k + \\ & + 6{,}90924\cdot10^{-6}\,F_j L_m - 0{,}242004\cdot10^{-3}\,H_k L_m\end{aligned} \tag{5.11d}$$

$$\begin{aligned}\Delta Rpk = {} & 16{,}992313\cdot10^{-3}\,Iz - 0{,}983248\cdot10^{-3}\,F_j - 5{,}952771\cdot10^{-3}\,H_k + \\ & + 3{,}540204\cdot10^{-3}\,L_m - 0{,}15765\cdot10^{-3}\,Iz\alpha_i + 0{,}101521\cdot10^{-3}\,IzF_j + \\ & + 0{,}240347\cdot10^{-3}\,IzH_k - 0{,}171369\cdot10^{-3}\,IzL_m - 0{,}8833\cdot10^{-6}\,\alpha_i F_j + \\ & + 45{,}1649\cdot10^{-3}\,\alpha_i H_k - 3{,}57238\cdot10^{-6}\,\alpha_i L_m + 5{,}51904\cdot10^{-6}\,F_j H_k + \\ & + 0{,}915412\cdot10^{-6}\,F_j L_m - 27{,}1439\cdot10^{-3}\,H_k L_m\end{aligned} \tag{5.11e}$$

3. Modele w postaci funkcji potęgowej:

$$\Delta m = 13{,}80195927\cdot10^{-6}\,Iz^{2{,}975965}\cdot\alpha_i^{-0{,}13509}\cdot F_j^{1{,}017783}\cdot H_k^{-0{,}4817}\cdot L_m^{-0{,}07533} \tag{5.12a}$$

$$\Delta l = 7{,}147842465\cdot10^{-6}\,Iz^{3{,}386111}\cdot\alpha_i^{-0{,}08586}\cdot F_j^{0{,}908377}\cdot H_k^{-0{,}29662}\cdot L_m^{-0{,}13828} \tag{5.12b}$$

$$\Delta Rq = 34{,}66430759\cdot10^{-6}\cdot Iz^{2{,}311522}\cdot\alpha_i^{-0{,}12884}\cdot F_j^{0{,}570421}\cdot H_k^{0{,}12034}\cdot L_m^{0{,}002389} \tag{5.12c}$$

$$\Delta Rt = 1{,}806398852\cdot10^{-3}\cdot Iz^{1{,}434688}\cdot\alpha_i^{-0{,}09069}\cdot F_j^{0{,}428136}\cdot H_k^{0{,}254251}\cdot L_m^{0{,}037574} \tag{5.12d}$$

$$\Delta Rpk = 77{,}57076036\cdot10^{-6}\,Iz^{2{,}923428}\cdot\alpha_i^{-0{,}08107}\cdot F_j^{0{,}262449}\cdot H_k^{-0{,}08561}\cdot L_m^{-0{,}03146} \tag{5.12e}$$

W celu sprawdzenia istotności modelu oraz jakości dopasowania wyznaczonych matematycznie równań regresji obliczono wartości wybranych statystyk.

Na podstawie statystyki F-Snedecora testowano istotność i adekwatność modeli, wyznaczono współczynnik regresji (F_{obl}) oraz 95% kwantyl rozkładu F-Snedecora (F_{tab}) dla wszystkich równań regresji. Podczas analizy wariancji okazało się, że wszystkie równania są istotne i adekwatne, ponieważ spełniają następujący warunek istotności i adekwatności [69]:

$$F/F_{tab.} \geq 4 \tag{5.13}$$

W celu porównania otrzymanych wszystkich modeli predykcyjnych opracowano dla każdego z nich następujące statystyczne wielkości:

- współczynnik korelacji wielokrotnej, R;
- współczynnik determinacji, R^2;
- błąd standardowy regresji, s.

W tabeli 5.5 zestawiono parametry równań regresji dla modeli predykcyjnych dotyczących relacji między stopniem izotropowości SGP a wielkościami determinującymi warunki współpracy elementów.

Tabela 5.5. Wyniki obliczeń statystycznych dla modeli predykcyjnych dotyczących relacji między stopniem izotropowości SGP (Iz) a wielkościami determinującymi warunki współpracy elementów

Statystyka / Rodzaj modelu dla Iz	R	R^2	s
Model w postaci funkcji liniowej	0,892091	0,795826	1,145049
Model w postaci funkcji liniowej z interakcjami	0,904621	0,818339	1,090684
Model w postaci funkcji potęgowej	0,980338	0,961062	0,024889

W wyniku analizy rezultatów obliczeń statystycznych opracowanych modeli predykcyjnych można stwierdzić, że spośród analizowanych typów równań do opisu zachodzących zmian w rozpatrywanej parze kinematycznej najlepiej przyjąć model w postaci funkcji potęgowej, ponieważ najdokładniej opisuje zarejestrowane w eksperymencie zmiany. Model ten charakteryzuje się największymi wartościami współczynników korelacji i determinacji oraz wyraźnie mniejszym błędem standardowym. Najgorzej dopasowany do zaobserwowanych pomiarów eksperymentalnych jest model liniowy. Poprawa dopasowania modelu liniowego z interakcjami w stosunku do modelu liniowego jest niewielka. Dodatkowo model ten jest najbardziej rozbudowany. Z uwzględnieniem z jednej strony prostej postaci modelu a z drugiej strony – jakości dopasowania

przy opisie zachodzących zmian w rozpatrywanej parze kinematycznej najlepiej przyjąć model w postaci równania potęgowego.

W tabelach 5.6, 5.7 i 5.8 przedstawiono statystykę regresji dla modeli predykcyjnych dotyczących relacji między wielkościami determinującymi cechy użytkowe a stopniem izotropowości i warunkami współpracy.

Tabela 5.6. Wyniki obliczeń statystycznych dla modeli w postaci funkcji liniowej

Statystyka / Badany parametr	R	R2	s
Δm	0,9275554	0,860359	0,2674466
Δl	0,9272208	0,8597384	0,3434718
ΔRq	0,9335243	0,8714676	0,0845588
ΔRt	0,9307208	0,8662412	0,4428903
ΔRpk	0,940372	0,8842995	0,05139

Tabela 5.7. Wyniki obliczeń statystycznych dla modeli w postaci funkcji liniowej z interakcjami

Statystyka / Badany parametr	R	R^2	s
Δm	0,9593716	0,9203939	0,0457387
Δl	0,9587075	0,9191201	0,083618
ΔRq	0,9697056	0,9403289	0,0115372
ΔRt	0,9693817	0,9397009	0,0810069
ΔRpk	0,9592314	0,9201245	0,0147925

Tabela 5.8. Wyniki obliczeń statystycznych dla modeli w postaci funkcji potęgowej

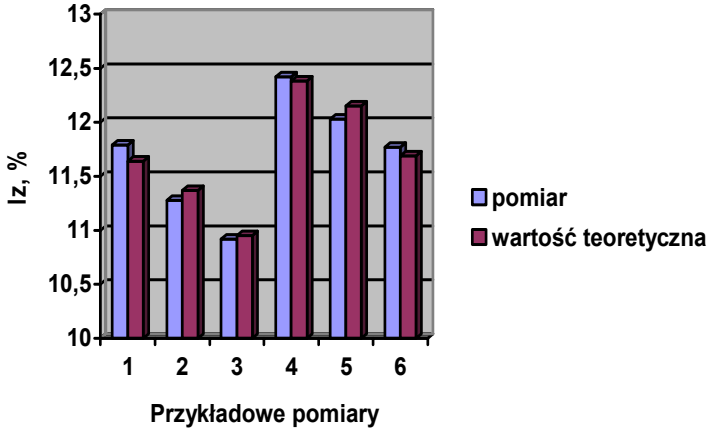
Statystyka / Badany parametr	R	R^2	s
Δm	0,991742	0,983552	0,074646
Δl	0,98732	0,974801	0,089902
ΔRq	0,994356	0,988743	0,040455
ΔRt	0,97369	0,948072	0,059662
ΔRpk	0,991011	0,982103	0,0544

W wyniku analizy tych obliczeń statystycznych można stwierdzić, że do opisu analizowanych relacji w rozpatrywanej parze kinematycznej – podobnie jak w przypadku modeli dla zmian stopnia izotropowości – najlepiej przyjąć modele w postaci funkcji potęgowej. Spośród wszystkich statystycznie ocenianych typów równań charakteryzują się one najlepszymi wartościami współczynników korelacji i determinacji. Dodatkowym atutem tych równań regresji jest prosta postać w stosunku do pozostałych.

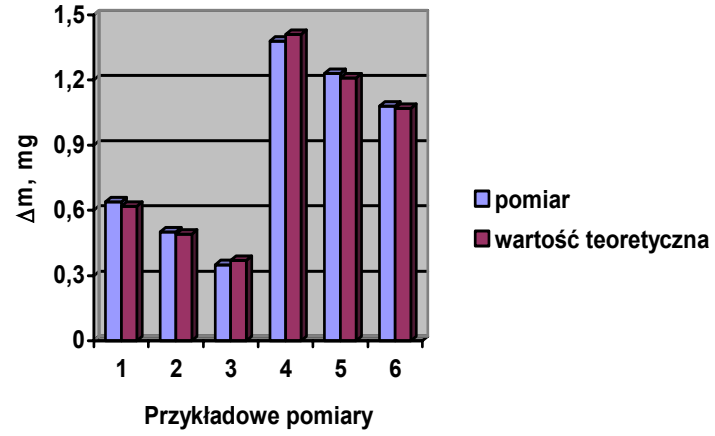
Na rysunku 5.41 przedstawiono porównanie wartości stopnia izotropowości uzyskanych z badań eksperymentalnych z wartościami wyznaczonymi z modelu potęgowego dla wybranych punktów pomiarowych, natomiast na rysunku 5.42 zaprezentowano porównanie zmiany masy próbek.

Pomiary 1, 2 i 3 dotyczą zmian dla odpowiednio: $\alpha_2 = 30^o$, $\alpha_4 = 60^o$, $\alpha_5 = 90^o$ przy $F_1 = 300$ N, natomiast 4, 5, 6 dla analogicznych kątów przy $F_3 = 600$ N. Pozostałe parametry dla wybranych punktów pomiarowych przyjęto jako stałe.

Porównanie to wykazuje, że estymowane równania regresji bardzo dobrze odzwierciedlają zmiany zarejestrowane w badaniach empirycznych bez względu na warunki i parametry badań.



Rys. 5.41. Porównanie wartości teoretycznych stopnia izotropowości Iz z wartościami uzyskanymi z pomiarów



Rys. 5.42. Porównanie wartości teoretycznych zmiany masy próbek Δm z wartościami uzyskanymi z pomiarów

Przedstawione powyżej wyniki rozważań analitycznych dotyczących opisu zaobserwowanych zmian w badaniach eksperymentalnych umożliwiają dobór cech warstwy wierzchniej, przy których będzie ona zapewniała oczekiwane cechy użytkowe.

6. WNIOSKI I PODSUMOWANIE

Przeprowadzona analiza informacji literaturowych oraz zrealizowane badania doświadczalne umożliwiają dokonanie licznych spostrzeżeń oraz sformułowanie wniosków. Spostrzeżenia przytoczono przy opisie poszczególnych zagadnień badawczych, natomiast sformułowane wnioski podzielono na trzy grupy:

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

6.1. WNIOSKI POZNAWCZE

Wnioski z tej grupy mają charakter ogólny, rozszerzając i weryfikując wiedzę z zakresu merytorycznego pracy.

1. Przeprowadzona analiza czynnikowa transformacji WW wykazała celowość wyróżnienia w niej dwóch integralnych etapów: transformacji TWW oraz transformacji EWW. Wynika to z faktu, że w podczas każdego etapu zachodzi ona pod wpływem całkowicie innego zbioru wymuszeń. Spośród czynników determinujących mechanizm transformacji TWW za najistotniejsze uznano:
   - rodzaj tworzywa konstrukcyjnego,
   - rodzaj obróbki (obrabiarka, narzędzia),
   - parametry obróbki,
   - warunki obróbki.

   Czynnikami, które w największym stopniu wpływają na mechanizm transformacji EWW, są:
   - rodzaj tworzywa konstrukcyjnego,
   - stan warstwy wierzchniej, szczególnie struktury geometrycznej powierzchni w tym jej kierunkowość,
   - obciążenie,
   - wzajemne relacje między parametrami SGP współpracujących powierzchni.
2. Izotropowość powierzchni, stanowiąca podstawowe zagadnienie w przedstawionych badaniach, ma istotny wpływ na przebieg transformacji WW zarówno w fazie dotyczącej TWW, jak i EWW. W pierwszej z nich jest czynnikiem wynikowym, zależnym od parametrów i warunków obróbki i stanowi jeden z istotnych czynników determinujących jej końcowy rezultat, natomiast w drugiej – od wartości stopnia izotropowości zależy intensywność procesu zużywania – zwłaszcza w pierwszej jego fazie.
3. Przeprowadzona doświadczalna weryfikacja przydatności wykorzystania w opisie transformacji warstwy wierzchniej stopnia izotropowości SGP wykazała celowość takich działań. Wykazano ponadto, że skojarzenie kątów

przecięcia śladów obróbki współpracujących powierzchni w istotny sposób wpływa na intensywność procesu zużywania.

4. W rezultacie oddziaływania eksploatacyjnych czynników wymuszających zmienia się wartość stopnia izotropowości współpracujących powierzchni. Zachodzące w SGP zmiany powodują, że jego wartość rośnie.
5. Z uwagi na wykazane znaczenie kąta między charakterystyczną kierunkowością współpracujących powierzchni w transformacji warstwy wierzchniej stwierdzono, że wpływa on na zmiany w styku powierzchni. Wykorzystanie stopnia izotropowości struktury w opisie zmian w WW może wówczas ułatwić różnicowanie zmian wielkości determinujących cechy użytkowe.
   Zwiększenie kąta między kierunkowością współpracujących powierzchni powoduje, że maleje intensywność zmian czynników opisujących intensywność zużywania (ubytku masy, parametrów chropowatości). Przy kącie 0º – ślady są równoległe – „zaczepiają się" wzajemnie i opory są największe, występują także trudności w rozprowadzaniu smaru. Przy kącie 90º (ślady są prostopadłe) współpracujące powierzchnie przesuwają się wzajemnie po wierzchołkach mikronierówności i opory ruchu są mniejsze. Zapewniony jest wówczas również swobodniejszy przepływ środka smarującego i stworzone są warunki do jego magazynowania w bruzdach.
   Relacja ta nie jest monotoniczna, a zmiana intensywności procesu zużywania wymaga dalszych badań.
6. Spośród pozostałych wielkości determinujących transformację warstwy wierzchniej wykazano istotność obciążenia oraz twardości materiału. Stwierdzono ponadto, że prędkość ruchu względnego w badanych warunkach nie ma wpływu na zmiany w warstwie wierzchniej.
   Zwiększanie obciążenia powoduje intensyfikację zmian czynników badanych, natomiast wzrost twardości materiału wpływa na zmniejszenie się tych zmian.
7. Istotny wpływ badanych czynników występuje tylko na początku współpracy (droga tarcia ok. 500 m), po czym następuje stabilizacja zmian. W tej fazie eksploatacji czynniki badane w niewielkim stopniu wpływają na zmiany w warstwie wierzchniej. Jest to zgodne z naturalnym charakterem procesu zużywania.
8. Sposób smarowania i chłodzenia w czasie konstytuowania SGP wpływa na jej ukształtowanie, ma więc pośredni wpływ na cechy użytkowe par kinematycznych o styku konforemnym.

6.2. WNIOSKI UTYLITARNE

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

1. Znajomość zmian w procesie zużywania pod wpływem czynników, które są uwarunkowane technologicznie, można wykorzystać przy projektowaniu

procesu technologicznego elementów par kinematycznych. Wymuszenia technologiczne determinują SGP, w tym jej kierunkowość, a więc w dużym stopniu wpływają na przebieg transformacji WW i cechy użytkowe technologicznej warstwy wierzchniej powstałej w wyniku realizacji określonych operacji technologicznych.

2. Opracowane modele matematyczne mają charakter predykcyjny – opisują relacje między wymuszeniami technologicznymi i eksploatacyjnymi a zmianami parametrów podczas procesu zużywania, mogą także stanowić narzędzie w prognozowaniu jego przebiegu.
3. Wyniki badań eksperymentalnych oraz opracowane modele mogą stanowić pomoc przy projektowaniu i konstruowaniu elementów par kinematycznych, ponieważ uwzględniają kierunkowość SGP oraz ich relację do parametrów istotnych w transformacji warstwy wierzchniej.
4. Znajomość mechanizmu transformacji eksploatacyjnej warstwy wierzchniej oraz ilościowego opisu relacji istotnych jej parametrów jest przydatnym elementem w projektowaniu procesów eksploatowania obiektów technicznych oraz diagnozowania i prognozowania ich stanu.
5. Powłoka ceramiczna naniesiona na powierzchnię powoduje zróżnicowaną zmianę stopnia izotropowości. W przypadku węglika spiekanego (WC) zmiany te są nieznaczne, natomiast w przypadku powierzchni o wyraźnej anizotropowości (stali narzędziowej) zmiany są bardzo widoczne.
6. Naniesiona powłoka ceramiczna nie powoduje zmniejszenia intensywności transformacji WW. Czynnikiem, który zmniejsza intensywność tego procesu, jest twardość powłoki, zdecydowanie większa niż pokrywane tworzywo.

6.3. KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Zrealizowane badania doświadczalne oraz sformułowane wnioski umożliwiają wskazanie kierunków dalszych badań dotyczących opisu transformacji WW. Zestawiono je bez ich hierarchizacji poniżej.

1. Opracowanie ujednoliconego zbioru parametrów opisujących w sposób uniwersalny, ale jednocześnie wystarczający, transformację warstwy wierzchniej. Obecnie przy bardzo dużej ilości parametrów opisujących zużywanie często trudno jednoznacznie wnioskować i porównywać wyniki badań, pomimo zbieżnych warunków badań.
2. Wyznaczenie relacji między zbiorem wymuszeń technologicznych nieuwzględnianych w pracy a cechami użytkowymi warstw wierzchnich elementów par ciernych. Zbiór wymuszeń powinien obejmować czynniki wpływające na izotropowość SGP. Przyczyni się to do pełniejszego poznania zmian w strukturze geometrycznej powierzchni zachodzących podczas transformacji warstwy wierzchniej.

3. Przeprowadzenie badań dotyczących relacji między czynnikami ekologicznymi (ilością lub brakiem cieczy chłodząco-smarującej) a cechami ukonstytuowanej SGP.
4. Istotnym wydaje się również aspekt zbadania wpływu kąta między kierunkowością współpracujących powierzchni na warunki smarowania takiego węzła ciernego.
5. Celowym wydaje się poszerzenie badań o inne tworzywa konstrukcyjne, szczególnie ze względu na ciągle powiększający się ich zbiór.

Realizacja badań o proponowanej wyżej tematyce przyczyni się niewątpliwie do rozszerzenia wiedzy o zjawiskach tribologicznych towarzyszących współpracy elementów par kinematycznych o różnych ukształtowaniach SGP zwłaszcza w zakresie kierunkowości. Poznana lepiej będzie również transformacja WW, szczególnie w aspekcie istotności SGP w jej przebiegu.

6.4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania eksperymentalne i analityczne zweryfikowały pozytywnie pierwszą część hipotezy. Stwierdzono bowiem bezspornie, że kierunkowość struktury powierzchni w sposób istotny wpływa na przebieg transformacji zarówno technologicznej, jak i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej.

Potwierdzono również, że uwzględnienie stopnia izotropowości – jednej z miar kierunkowości w analizie zachodzących w warstwie wierzchniej zmian – powoduje zwiększenie ilościowego opisu transformacji warstwy wierzchniej.

Adekwatność modeli predykcyjnych opracowanych w rezultacie zrealizowanych badań eksperymentalnych pozwala na stwierdzenie, że założony cel badań został osiągnięty.

Wskazane kierunki dalszych prac badawczych są w dużym stopniu zbieżne z ogólnymi trendami obserwowanymi w badaniach tribologicznych. Potwierdza to trafność wyboru tematyki badań prezentowanych w pracy.

LITERATURA

[1] Abbott E.J., Firestone F.A., 1993. Specyfing surface quality. Mechanical Engineering 55, 556-572.

[2] Abouelatta O.B., Madl L., 2001. Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations. J. Mater. Process. Technol. 118, 269-277.

[3] Alauddin M., El-Baradie M.A., Hashmi M.S.J., 1995. Computer-aided analysis of a surface roughness model for end milling. J. Mater. Process. Technol. 55, 123-127.

[4] Alcock J., Sorensen T.O., Jensen S., Kjeldsteen P., 1996. Comparative wear mapping techniques. Suface roughness and fractal dimension mapping of tungsten carbide/silicon carbide. Wear 194, 228-237.

[5] Ali Y.M., Zhang L.C., 1999. Surface roughness predictions of ground components using a fuzzy logic approach. J. Mater. Process. Technol. 89/90, 561-568.

[6] Almsyah C., Dillich S., Pettit A., 1989. The effect of surface finish on cam wear. Wear 134, 29-47.

[7] Andersson P., Juhanko J., Nikkila A.-P., Lintula P., 1996. Influence of topography on the running-in of water-lubricates silicon carbide journal bearings. Wear 201, 1-9.

[8] Autret R., Liang S.Y., Woodruff G.W., 2003. Minimum quantity lubrication in finish hard turning. Proc. Int. Conf. Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management HNICEM, 26-28.

[9] Avila R.F., Abrao A.M., 2001. The effect of cutting fluids on the machining of hardened AISI 4340 steel. J. Mater. Process. Technol. 119, 21-26.

[10] Bakker A.B., Salanova M., Llorens S., 2006. Flow at Work: Evidence for an upward spiral of personal and organizational resources. J. Happiness Stud. 7, 1-22.

[11] Bałamucki J., Dembiński B., Gadżała F., Szubert Z., Żebrowski H., 1995. Konstytuowanie warstwy wierzchniej w toczeniu. Mat. XVIII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Szklarska Poręba, 9-20.

[12] Barre F., Lopez J., Mathia T.G., 1997. New methods for characterising the anisotropy of engineering surfaces. Trans. 7th Int. Conf. Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Gothenburg, 479-486.

[13] Bartoszewicz A., Radziejewska J., Starzyński G., Musialik J., 2002. Evaluation of geometrical structure and contact stiffness of surfaces after electromechanical burnishing. Advances in Manufacturing Sci. Technol. 26, 5-23.

[14] Bator A., Duda P., Michalczewski R., Służałek G., Wróbel Z., 2012. Analiza systemów zbierania danych pomiarowych z urządzeń do badań tribologicznych. Tribologia 6, 25-35.

[15] Benes J., 2007. Cutting the coolant. American Machinist 8, 36.

[16] Bengsston A., Roennberg A., 1986. The absolute measurement of running-in. Wear 109, 329-342.
[17] Bennett J.M., 1992. Recent developments in surface roughness characterization. Measurement Sci. Technol. 3, 1119-1127.
[18] Bergan C.C., Titze I.R., 2001. Perception of pitch and roughness in vocal signals with subharmonics. J. Voice 15, 165-175.
[19] Bernardos P.G., Vosniakos G.C., 2003. Predicting surface roughness in machining: a review. Int. J. Mach. Tool. Manuf. 43, 833-844.
[20] Bezjazycznyj V.F., 2002. Wpływ jakości warstwy wierzchniej po obróbce mechanicznej na właściwości eksploatacyjne części maszyn. Zag. Ekspl. Masz. 2, 7-27.
[21] Bhushan B., 1990. Tribology and mechanics of magnetic storage devices. Springer New York.
[22] Biernacki K., 2000. Wpływ chropowatości powierzchni i temperatury na przepływ smaru plastycznego w warstwie przyściennej. Tribologia 2, 187-198.
[23] Blunt L., Ebdon S., 1996. The application of three-dimensional surface measurement techniques to characterizing grinding wheel topography. Int. J. Mach. Tool. Manuf. 36, 1207-1226.
[24] Boryczko A., 1987. Przemieszczenie narzędzia i przedmiotu a zakłócenia struktury geometrycznej powierzchni toczonych. Mechanik 5, 211-214.
[25] Boryczko A., 1999. Przemieszczenie względne narzędzia do przedmiotu a nierówności powierzchni toczonych. Mat. VIII Konf. Nauk. Tech. Metrologia w Technikach Wytwarzania Maszyn, Szczecin, 211-213.
[26] 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.
[27] Boudreau B.D., Raja J., 1992. Analysis of lay characteristics of three-dimensional surface maps. Int. J. Mach. Tool. Manuf. 32, 171-177.
[28] Brendle M.C., Diss P.H., Spano F.J., 1999. 3D optical-profilometric assessment of transfer and its significante for the mechanisms of primary particle detachment and wear. Wear 225, 417-426.
[29] Brinksemeier E., 1982. Residual stresses – measurement and causes in machining processes. Ann. CIRP 31, 59-63.
[30] Britton R.D., Elcoate C.D., Alanou M.P., Evans H.P., Snidle R.W., 2000. Effect of surface finish on gear tooth friction. ASME J. Tribol. 122, 354-360.
[31] Brown C.A., Johnsen W.A., Huld K.M., 1997. Scale-sensitivity, fractal analysis and simulations. Proc. 7th Conf. Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Gothenburg, 239-243.
[32] Budinski K.J., 1988. Surface engineering for wear resistance. Prentice Hall New York.

[33] Budzoń P., Lenkiewicz W., Olesiak Z., 1986. Standaryzacja dokumentacji badań tribologicznych na przykładzie tarcia tocznego. Zag. Ekspl. Masz. 1, 233-240.
[34] Burakowski T., 1996. Inżynieria powierzchni wczoraj, dziś i jutro. Inżynieria Powierzchni 1, 3-10.
[35] Burakowski T., 1998. Rozwój inżynierii powierzchni a rozwój inżynierii eksploatacji. Tribologia 5, 829-843.
[36] Burakowski T., 2002. Znaczenie inżynierii powierzchni w tribologii. Tribologia 4, 1097-1111.
[37] Burakowski T., 2004. Rozważania o synergizmie w inżynierii powierzchni. Wyd. Politechniki Radomskiej.
[38] Burakowski T., 2007. Areologia. Powstanie i rozwój. Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji Radom.
[39] Burakowski T., 2013. Areologia. Podstawy teoretyczne. Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji Radom.
[40] Byrne G., Dornfeld D., Denkena B., 2003. Advancing cutting technology. Ann. CIRP 52, 483-507.
[41] Cann P., Ioannides E., Jacobson B., Lubrecht A.A., 1994. Lambda ratio – a critical re-examination. Wear 175, 177-188
[42] Chetwynd D.G., McKee F.A., Wride C.H., 1987. The measurement of wear damage. Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part C: J. Mechanical Engineering Sci. 201, 251-258.
[43] Chowdhury I.A., El-Baradje M.A., 1997. Surface roughness prediction in the turning of high-strength steel by factorial design of experimental. J. Mater. Process. Technol. 67, 55-61.
[44] Cichosz P., Kowalski M., 2004. Modelowanie matematyczne topografii powierzchni płaskowierzchołkowych typu „plateau". Zesz. Nauk. Wydz. Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej 36, 195-202.
[45] Cichosz P., Krawiec S., Szymkowski J., Żebrowski H., 1999. Pomiar i analiza zmian udziału nośnego współpracujących powierzchni podczas ich docierania. Mat. VIII Konf. N-T Metrologia w Technikach Wytwarzania Maszyn, Szczecin, 227-234.
[46] Czarnecki H., 2005. Analiza teoretyczna wpływu stereometrii powierzchni na działanie pary tribologicznej. Tribologia 4, 19-31.
[47] Czarnecki H., 2009. Analiza zmian struktury geometrycznej powierzchni (3D) w procesie tarcia. Tribologia 5, 25-34.
[48] Czarnecki H., Tubielewicz K., 1995. Własności tribologiczne powierzchni z regularnym mikroprofilem po różnych technologiach obróbki wykańczającej. Tribologia 4, 413-416.
[49] Daca J., Rudnicki Z., Warszyński M., 2003. Analiza wpływu topografii powierzchni na przebieg zjawisk tribologicznych. Mat. XXI Sympozjonu PKM, t. 1, Bielsko-Biała, 213-218.
[50] Dagnall H., 1986. Exploring surface texture. Rank Taylor Hobson Leicester.

[51] Davim J.P., 2001. A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments. J. Mater. Process. Technol. 116, 305-308.
[52] Dąbrowski L., Gawarkiewicz R., Wasilczuk M., 2004. Wyznaczanie drogi tarcia w warunkach ślizgania oscylacyjnego o małej amplitudzie. Tribologia 5, 49-57.
[53] Dąbrowski L., Marciniak M., 1999. Stan warstwy wierzchniej po szlifowaniu ze zwiększonym udziałem mikroskrawania. Pr. Nauk. Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej 74, 83-88.
[54] De Chiffre L., 1999. Industrial survey on ISO surface texture parameters. Ann. CIRP 48, 463-466.
[55] Derflinger V., Brandle H., Zimmermann H., 1999. New hard lubricant coating for dry machining. Surf. Coat. Technol. 113, 286-292.
[56] Dhar N.R., Ahmed M.T., Islam S., 2007. An experimental investigation on effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel. Int. J. Mach. Tool. Manuf. 47, 748-753.
[57] 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. J. Mater. Process. Technol. 172, 299-304.
[58] Dhar N.R., Paul S., Chattopadhayay A.B., 2001. The influence of cryogenic cooling on tool wear, dimensional accuracy and surface finish in turning AISI 1040 and E4340C steels. Wear 249, 932-942.
[59] Diniz A.E., de Oliveira A.J., 2004. Optimizing the use of dry cutting in rough turning steel operations. Int. J. Mach. Tool. Manuf. 44, 1061-1067.
[60] Diniz A.E., Ferreira J.R., Filho F.T., 2003. Influence of refrigeration/ lubrication condition on SEA 52100 hardened steel turning at several cutting speeds. Int. J. Mach. Tool. Manuf. 43, 317-326.
[61] Diniz A.E., Filho J.C., 1999. Influence of the relative positions of tool and workpiece on tool life, tool wear and surface finish in the face milling process. Wear 232, 67-75.
[62] Diniz A.E., Micaroni R., 2002. Cutting conditions for finish turning process aiming the use of dry cutting. Int. J. Mach. Tool. Manuf. 42, 899-904.
[63] Dong W.P., 1992. The significante of surface features in characterising 2D and 3D surface topography. ASME PED 62, 1-15.
[64] Dong W.P., 2001. Areal autocorrelation and spectral analysis of surface topography. [In:] Metrology and properties of engineering surfaces, eds. E. Mainsah, J.A. Greenwood, D.G. Chetwynd, Kluwer Boston, 169-202.
[65] Dong W.P., Sullivan P.J., Stout K.J., 1993. Comprehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography. II. Statistical properties of parameters variations. Wear 167, 9-21.

[66] Dong W.P., Sullivan P.J., Stout K.J., 1994. Comprehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography. III. Parameters for characterising amplitude and some functional properties. Wear 178, 29-43.
[67] Dong W.P., Sullivan P.J., Stout K.J., 1994. Comprehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography. IV. Parameters for characterising spatial and hybrid properties. Wear 178, 45-60.
[68] Dowson D. (ed.), 2004. Experimental methods in tribology. Tribology series 44, Elsevier Amsterdam.
[69] Draper N.R., Smith H., 1973. Analiza regresji stosowanej. Wyd. Nauk. PWN Warszawa.
[70] Duś-Sitek M., 1999. Doświadczalne stwierdzenie istnienia strefy nadpowierzchniowej warstwy wierzchniej – modyfikacja modelu warstwy wierzchniej. Inżynieria Powierzchni 1, 29-34.
[71] Dyrbuś G., 1998. Obróbka z minimalnym smarowaniem. Pr. Nauk. Katedry Budowy Maszyn Politechniki Śląskiej 2, 135-140.
[72] Ehmann K.F., Hong M.S., 1994. A generalized model of the surface generation process in metal cutting. Ann. CIRP 43, 483-486.
[73] Evans C.J., Bryan J.B., 1999. „Structured", „textured" or „engineered" surfaces. Ann. CIRP 48, 541-556.
[74] Filicea L., Micarib F., Rizzutia S., Umbrello D., 2007. A critical analysis on the friction modelling in orthogonal machining. Int. J. Mach. Tool. Manuf. 47, 709-714.
[75] Fleischer G., 1999. Studie zur Energie – und Verschleißverteilung zwischen den Festkörpern während der Reibung. Universität Otto von Guericke Magdeburg.
[76] Ford I.J., 1993. Roughness effect on friction for multi-asperity contact between surfaces. J. Phys. D 26, 2219-2225.
[77] Fromentin G., Bierla A., Minfray C., Poulachon G., 2010. An experimental study on the effects of lubrication in form tapping. Tribol. Int. 43, 1726-1734.
[78] Fuh K.H., Wu C.F., 1995. A proposed statistical model for surface quality prediction in end milling of Al alloy. Int. J. Mach. Tool. Manuf. 55, 1187-1200.
[79] Gawlik J., Zębala W., Matras A., 2011. Technologiczne i tribologiczne aspekty obróbki precyzyjnej. Tribologia 4, 79-95.
[80] Gerbig Y.B., Ahmed S.I.-U., Chetwynd D.G., Haefke H., 2006. Effect of nanoscale topography and chemical composition of surfaces on their microfrictional behavior. Tribol. Lett. 21, 161-168.
[81] Ghani A.K., Chowdhury I.A., 2002. Study of tool life, surface roughness and vibration in machining nodular cast iron with ceramic tool. J. Mater. Process. Technol. 127, 17-22.
[82] Giessler J., 2004. Cut and dried technology. Machinery 162, 6-7.

[83] Godet M., 1984. The third body approach: A mechanical view of wear. Wear 100, 437-452.
[84] Gołąbczak A., Święcik R., 2005. Wpływ elektroerozyjnego szlifowania na wybrane parametry struktury geometrycznej powierzchni. [W:] Obróbka ścierna w technikach wytwarzania, red. L. Dąbrowski, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 243-250.
[85] Górecka R., Polański Z., 1983. Metrologia warstwy wierzchniej. WNT, Warszawa.
[86] Greń J., 1982. Statystyka matematyczna, modele i zadania. Wyd. Nauk. PWN Warszawa.
[87] Grieve D.J., 1970. A normal wear process examined by measurements of surface topography. Ann. CIRP 18, 585-592.
[88] Griffits B.J., Middleton R.H., Wilkie B.A., 1996. Condition monitoring of the grinding process using light scattering. Wear 198, 39-45.
[89] Grigoriev A.Ya., Chizhik S.A., Myshkin N.K., 1998. Texture classification of engineering surfaces with nanoscale roughness. Int. J. Mach. Tool. Manuf. 38, 719-724.
[90] Grzesik W., 1995. Surface finish assessment using a tribo-mechanical coupled model of the cutting process. Tribologia 6, 726-744.
[91] Grzesik W., 1996. A revised model for predicting surface roughness in turning. Wear 194, 143-148.
[92] Grzesik W., 1998. Podstawy skrawania materiałów metalowych. WNT Warszawa.
[93] Grzesik W., 2000. An integrated approach to evaluating the tribo-contact for coated cutting inserts. Wear 240, 9-18.
[94] Grzesik W., Zalisz Z., Nieslony P., 2002. Friction and wear testing of multilayer coatings on carbide substrates for dry machining applications. Surf. Coat. Technol. 155, 37-45.
[95] Handzel-Powierża Z., 1990. Warstwa wierzchnia i problemy jej identyfikacji. Wybrane problemy tribologii. Wyd. Nauk. PWN Warszawa.
[96] Havet L., Blouet J., Robbe Valloire F., Brasseur E., Slomka D., 2001. Tribological characteristics of some environmentally friendly lubricants. Wear 248, 140-146.
[97] Hebda M., Wachal A., 1980. Trybologia. WNT Warszawa.
[98] Heisel U., Milberg J., 1994. Vibrations and surface generation in slab miling. Ann. CIRP 43, 337-340.
[99] Hennrich G., 1998. Trockenbearbeitung – die umweltfreundliche Fertigungstechnik. Werkstattstechnik 9-10, 337.
[100] Hisakado T., Suda H., 1999. Effects of asperity shape and summit height distributions on friction and wear characteristics. Wear 225, 450-457.
[101] Hong M.S., 1994. Generation, characterization and synthesis of engineering surfaces. Northwestern University Evanston.

[102] Horng J.H., Leng M.L., Lee J.S., 2002. The contact characteristics of rough surfaces in line contact during running-in process. Wear 253, 899-913.
[103] Horng J.H. Lin J.F., Lee K.Y., 1994. The effect of surface irregularities on the tribological behaviour of steel rollers under rolling-sliding contact. ASME J. Tribol. 116, 209-218.
[104] Horng J.H., Lin J.F., Li K.Y., 1995. Effect of surface roughness on steel roller scuffing. Wear 184, 203-212.
[105] 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. J. Achiev. Mater. Manuf. Eng. 2, 485-490.
[106] Hutchings I.M., 2003. Tribology. Friction and wear of engineering materials. Elsevier Cambridge.
[107] Hwang T.W., Evens C.J., Malkin S., 2000. High speed grinding of silicon nitride with electroplated diamond wheels. ASME J. Manuf. Sci. Eng. 122, 32-50.
[108] Itoigawa F., Childs T.H.C., Nakamura T., Belluco W., 2006. Effects and mechanisms in minimal quantity lubrication machining of aluminium alloy. Wear 260, 339-344.
[109] Jacobson B., 2003. The Stribeck memorial lecture. Tribol. Int. 36, 781-789.
[110] Jacobson S., Wallen P., Hogmark S., 1997. Correlation between groove size, wear rate and topography of abraded surfaces. Wear 115, 83-93.
[111] Jang D.Y., Choi Y.G., Kim H.G., Hsiao A., 1996. Study of the correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop an on-line roughness measuring technique in hard turning. Int. J. Mach. Tool. Manuf. 36, 453-464.
[112] Jemielniak K., 2004. Obróbka skrawaniem. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
[113] Johnson K.L., Greenwood J.A., Poon S.Y., 1972. A simple theory of asperity contact in elastohydrodynamic lubrication. Wear 19, 91-108.
[114] Kacalak W., Szafraniec F., Królikowski T., Kunc R., Remelska H., 2010. Wybrane problemy maksymalizacji wydajności mikro- i nanoszlifowania dla ograniczeń nałożonych na określone parametry chropowatości powierzchni. [W:] Podstawy i Technika Obróbki Ściernej, red. A. Gołąbczak, B. Kruszyński, Wyd. Politechniki Łódzkiej, 229-240.
[115] Kacalak W., Szafraniec F., Tomkowski R., Lipiński D., Łukianowicz Cz., 2011. Metodyka oceny zdolności klasyfikacyjnej parametrów charakteryzujących cechy stereometryczne nierówności powierzchni. Pomiary Automatyka Kontrola 5, 542-546.
[116] Kacalak W., Tandecka K., 2012. Effect of superfinishing methods kinematic features on the machined surface. J. Machine Engineering 4, 35-48.

[117] Kaczmarek J., 1990. Analiza zmian i prognozowanie chropowatości powierzchni obrobionej w różnych odmianach szlifowania płaszczyzn. Tribologia 3, 12-15.
[118] Kaczmarek J., Klimczak T., 1986. Dwu- i trójwymiarowa charakterystyka mikronierówności powierzchni. Zag. Ekspl. Masz. 1, 39-46.
[119] Kaczmarek J., Wojciechowicz B., 1995. Zmiany w strategii badań eksploatacyjnej warstwy wierzchniej. Tribologia 6, 629-652.
[120] Kałdoński T. 1997. Zużywanie ścierne w systemach tribologicznych typu tłok-cylinder. Wyd. WAT Warszawa.
[121] Kałdoński T., 2003. Modele i parametry oceny zużywania ściernego. Biul. Wojskowej Akademii Technicznej 3, 21-41.
[122] Kapoor A., Williams J.A., Johnson K.L., 1994. Steady state sliding of rough surfaces. Wear 175, 81-92.
[123] Kawalec M., Jankowiak M., 1998. Kształtowanie mikronierównosci powierzchni w procesie dokładnego toczenia ostrzami polikrystalicznymi. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń 22, 79-91.
[124] Kawalec M., Jankowiak M., 1999. Wybrane właściwości technologiczne warstwy wierzchniej zahartowanych stali po toczeniu i frezowaniu czołowym. Pr. Nauk. Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej 74, 89-94.
[125] Kedziora H.J., Parsons F., Tabenkin A., 2004. Industrial problems with proliferation and expansion of surface finish parameters. Proc. 11th Int. Coll. on Surfaces, Chemnitz 1, 93-100.
[126] Kim B.H., Hu C.N., 1999. Texture prediction of milled surface using texture superposition method. Computer-Aided Design 31, 485-494.
[127] Kimura Y., Sugimura J., 1984. Microgeometry of sliding surfaces and wear particles in lubricated contact. Wear 100, 33-45.
[128] Klocke F., Eisenblatter G., 1997. Dry cutting. Ann. CIRP 46, 519-526.
[129] Kołodziej M., Kowalski K., Szubert Z., 1999. Geometryczne właściwości warstwy wierzchniej żeliwa szarego po rozwiercaniu. Pr. Nauk. Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej 74, 995--1000.
[130] Konczakowska A., Konczakowski A., 1978. Badania struktury geometrycznej powierzchni metodami korelacji i widmowymi. Mechanik 6, 294-296.
[131] Konczakowski A., 1991. Metrologiczne uwarunkowania analizy widmowej struktury geometrycznej powierzchni w diagnostyce obrabiarek. Zesz. Nauk. Politechniki Gdańskiej, Mechanika 62.
[132] Kopac J., Bahor M., Sokovic M., 2002. Optimal machining parameters for achieving the desired surface roughness in fine turning of cold pre-formed steel workpieces. Int. J. Mach. Tool. Manuf. 42, 707-716.
[133] Koszela W., 2002. Nagniatanie impulsowe powierzchni walcowych pracujących w warunkach tarcia. Pr. niepublikowana, Politechnika Rzeszowska.

[134] Koszela W., Gałda L., Dzierwa A., Sęp J., Pawlus P., 2010. Wpływ kieszeni smarowych na powierzchniach ślizgowych na zużycie ścierne. Tribologia 4, 171-180.
[135] Kotkowski K., Przyłęcki Z., 1991. Wpływ warstwy nawęglonej na ograniczoną wytrzymałość zmęczeniową stali ŁH15. Zesz. Nauk. Politechniki Rzeszowskiej, Mechanika 28, 281-292.
[136] Koura M.M., Omar M.A., 1981. The effect of surface parameters of friction. Wear 73, 235-246.
[137] Kowalski M., 2005. Metodyka wyboru parametrów chropowatości do opisu topografii powierzchni. Pr. niepublikowana, Politechnika Wrocławska.
[138] Krause H., Schroelkamp Ch., 1981. Investigation into the reaction of metallic bodies in tribological system. Proc. EUROTRIB'81, Warszawa, 324-329.
[139] Krawczyk J., 2010. Własności tribologiczne wybranych stali konstrukcyjnych. Tribologia 4, 223-233.
[140] Kress D., Fleischer R. 1996. Minimale schmierung bei aufbohr- und reibwerkzeugen. Reibung mit der Bohrwand minimieren. Industrie Anzeiger 17, 38.
[141] Krzyżak Z., Pawlus P., 2006. „Zero-wear" of piston skit surface topography. Wear 260, 554-561.
[142] Kubo M., Peklenik J., 1968. An analysis of micro-geometrical isotropy for random surface structures. Ann. CIRP 16, 235-242.
[143] Kula P., 2000. Inżynieria warstwy wierzchniej. Wyd. Politechniki Łódzkiej.
[144] Kumar Vikram Ch.R., Ramamoorthy B., 2007. Performance of coated tools during hard turning under minimum fluid application. J. Mater. Process. Technol. 185, 210-216.
[145] Kuttkat B., 2001. Trockenbearbeitung senkt die Fertigungskosten. Maschinenmarkt 36, 68-73.
[146] Lamers H., 1996. MMKS auf dem Vormarsch. Maschine 7-8, 34-36.
[147] Landgraf G., 2004. Dry goods. Cutting Tool Enginering 1, 44-48.
[148] Larson M.C., Miles H. F., 1998. On the effects of friction, roughness and toughness on interfacial sliding in brittle composites. Mech. Mater. 27, 77-89.
[149] Latoś H., 1999. Podstawy doboru kierunkowości i struktury powierzchni o określonych właściwościach tarciowych. Pr. Nauk. Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej 74, Konferencje 34, 117-124.
[150] Lawrowski Z., 2002. Materiały ślizgowe. Historia, teraźniejszość, przyszłość. Tribologia 4, 1221-1238.
[151] Lawrowski Z., 2008. Tribologia: tarcie, zużywanie i smarowanie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.

[152] Lee K.Y., Kang M.C., Jeong Y.H., Lee D.W., Kim J.S., 2001. Simulation of surface roughness and profile in high-speed end milling. J. Mater. Process. Technol. 113, 410-415.
[153] Lee S.-Y., Kim H.-N., 2001. Effects of cutting conditions on surface roughness in turning. J. Society Precision Engineering 18, 139-149.
[154] Legutko S., Nosal S., 2004. Kształtowanie technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej. Ośrodek Wydawnictw Naukowych PAN Poznań.
[155] Leppert T., 2008. Badania wpływu sposobu chłodzenia i smarowania na siły skrawania podczas toczenia. Mat. Szkoły Obróbki Skrawaniem Obróbka Skrawaniem – Innowacje, Kraków, 368-376.
[156] Leppert T., 2009. Zużycie ostrza w warunkach toczenia na sucho i z MQL. [W:] Obróbka skrawaniem, t. 3, red. H. Latoś, Wyd. Uczeln. UTP w Bydgoszczy, 163-169.
[157] Leszek W., 1994. Jeszcze raz i nieco inaczej o tribologii. Wyd. Międzyresortowe Centrum Naukowe Eksploatacji Majątku Trwałego Radom.
[158] Leszek W., 2006. Wybrane zagadnienia metodyczne badań empirycznych. Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji Radom.
[159] Leszek W., 2013. Metodologiczne podstawy badań porównawczych w tribologii. Tribologia 1, 9-24.
[160] Leśniewski T., Krawiec S., 2004. Wpływ twardości stalowych materiałów ślizgowych na ich zużycie. Tribologia 3, 237-245.
[161] Li C.G., Dong S., Zhang G.X., 2000. Evaluation of the anisotropy of machined 3D surface topography. Wear 237, 211-216.
[162] Li K.M., Liang S.Y., 2007. Modelling of cutting forces in near dry machining under tool wear effect. Int. J. Mach. Tool. Manuf. 47, 1292-1301.
[163] Li K.M., Liang S.Y., 2007. Performance profiling of minimum quantity lubrication in machining. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 35, 226-233.
[164] Liao T.W., 1995. Fractal and DDS characterisation of diamond wheel profiles. J. Mater. Process. Technol. 53, 567-581.
[165] Liao Y.S., Lin H.M., 2007. Mechanism of minimum quantity lubrication in high-speed milling of hardened steel. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 47, 1660-1666.
[166] 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. Int. J. Mach. Tool. Manuf. 38, 763-782.
[167] Lin T.Y., Blunt L., Stout K.J., 1993. Determination of the proper frequency bandwidth for 3D topography measurement using spectral analysis. Part I: Isotropic surface. Wear 166, 221-232.
[168] Litwiński M., Piec P., 2008. Ocena odporności na zacieranie pierścieni tłokowych. Tribologia 3, 79-86.
[169] Loukyanov V.S., 1980. Local irregularities of the surface and their influence on surface roughness parameters. Ann. CIRP 29, 423-428.
[170] Lubimow W., 1992. Tiechnołogiczeskije osnovy upravlenija sistiemoj riezanija po šerochovatosti povierchnosti. KPI Kijów.

[171] Lubimow W., Oczoś K.E., 1997. Wybrane zagadnienia kształtowania nierówności powierzchni w procesach obróbkowych. Mechanik 3, 81-84.
[172] Ludema K.C., 1996. Friction, wear, lubrication. A textbook in tribology. CRC Press Boca Raton.
[173] Lunde L., Tonder K., 1997. Numerical simulation of the effects of three-dimensional roughness on hydrodynamic lubrication: Correlation coefficients. ASME J. Tribol. 119, 315-322.
[174] Łubiński T., Druet K., 1991. Laboratoryjne badania fenomenologii zmęczenia warstwy wierzchniej elementów tocznych. Zesz. Nauk. Politechniki Rzeszowskiej, Mechanika 28, 447-454.
[175] Łunarski J. (red.), 1989. Obróbka powierzchniowa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
[176] Łunarski J., 2009. Tribotechnologia i jej relacje z tribologią. Tribologia 2, 71-80.
[177] Ma Z., Henein N.E., Bryzik W., Glidewell J., 1998. Break-in liner wear and piston ring assembly friction in a spark – ingnited engine. Tribol. Trans. 41, 497-504.
[178] Machado A.R., Wallbank J., 1997. The effect of extremely low lubricant volumes in machining. Wear 210, 76-82.
[179] Marczak R., 2002. Warstwa wierzchnia. Współczesny stan wiedzy i kierunki przyszłych badań. Tribologia 3, 939-955.
[180] Matthews A., Franklin S., Holmberg K., 2007. Tribological Coatings: Contact Mechanisms and Selection. J. Phys. D: Appl. Phys. 40, 5463-5475.
[181] Matuszewski M., 2007. Wpływ kierunkowości struktury powierzchni na zmiany parametru Ra w procesie docierania eksploatacyjnego. Zesz. Nauk. Wydz. Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej 40, 194-199.
[182] Matuszewski M., 2008. Badanie wpływu wybranych parametrów struktury geometrycznej powierzchni elementów par kinematycznych na proces ich zużywania. Pr. niepublikowana, UTP Bydgoszcz.
[183] Matuszewski M., 2008. Kierunkowość struktury geometrycznej powierzchni jako charakterystyczna cecha eksploatacyjna. Tribologia 3, 105-114.
[184] Matuszewski M., 2010. Wear process of kinematic pairs elements and method of their machining. Proc. 8th Int. Symp. Insycont, Kraków, 111-120.
[185] Matuszewski M., 2010. Wpływ kierunkowości struktury geometrycznej powierzchni na trwałość elementów par kinematycznych. Ekologia i Technika 6, 385-388.
[186] Matuszewski M., 2010. Zużycie masowe elementów pary ciernej z powierzchniami anizotropowymi. Tribologia 1, 93-102.
[187] Matuszewski M., 2013. Features surface geometric structure of machine elements and wear related loss of component weight in friction pair with conformal contact. Int. Scientific J. Problems of Tribol. 1, 81-86.

[188] Matuszewski M., Kałaczyński T., Łukasiewicz M., Musiał J., 2013. Surface geometric structure after various treatments and wear process. Int. Scientific J. Problems of Tribol. 1, 75-80.
[189] Matuszewski M., Łukasiewicz M., Musiał J., 2012. Application of spectral analyses for surface layer changes estimation of co-operating units with conformal contact. J. Polish CIMAC 7/3, 191-197.
[190] Matuszewski M., Musiał J., Styp-Rekowski M., 2012. Stopień izotropowości struktury powierzchni elementów maszyn a proces zużywania. Tribologia 6, 121-128.
[191] Matuszewski M., Styp-Rekowski M., 2006. Influence of texture direction of kinematic pair elements surfaces on service operated layer transformation. Tribologia 4, 87-97.
[192] Matuszewski M., Styp-Rekowski M., 2007. Wpływ kierunkowości struktury geometrycznej powierzchni na intensywność zużywania par ciernych. Tribologia 2, 469-478.
[193] Mazurkiewicz A., Smolik J., Walkowicz J., 2002. New technologies of surface engineering in the area of industrial implementation. Advances in Manufacturing Sci. Technol. 26(3), 25-37.
[194] Meine K., Schneider T., Spaltmann D., Santner E., 2002. The influence of roughness on friction. II: The influence of multiple steps. Wear 253, 733-738.
[195] Miko E., 1999. Pomiary drgań względnych i mikronierówności powierzchni przy toczeniu ukośnym. Mat. VIII Konf. Nauk. Tech. Metrologia w Technikach Wytwarzania Maszyn, Szczecin, 279-286.
[196] Miko E., 2002. Chropowatość powierzchni frezowanych walcowo. Przegląd Mechaniczny 11, 30-36.
[197] Miko E., Rusek P., Skrzypiński A., 1990. Modelowanie chropowatości powierzchni konstytuowanej w procesie toczenia. Archiwum Technologii Budowy Maszyn 8, 443-451.
[198] Monka P., 2002. Identification of geometrical characteristics of the turning tool from the point of view of roughness of the machined surfaces. Pr. niepublikowana, Politechnika w Koszycach.
[199] Mori M., Kumehara H., 1976. Replication of cutting edge roughness on the work surface. Bull. Jpn. Soc. Precis. Eng. 10, 171-179.
[200] Munoz-Escalona P., Cassier Z., 1998. Influence of the critical cutting speed on the surface finish of turned steel. Wear 218, 103-109.
[201] Muralikrishnan B., Raja J., 2004. Inference engine for process diagnostics and functional correlation in surface metrology. Wear 257, 1257-1263.
[202] Muralikrishnan B., Raja J., 2004. Process diagnostics and functional correlation in surface metrology. Measurement 36, 175-183.
[203] Musialik J., 2001. Stereometria warstwy wierzchniej po nagniataniu elektromechnicznym. Mat. Konf. Wytwarzanie elementów maszyn ze stopów metali o specjalnych właściwościach, Rzeszów-Bystre, 91-96.

[204] Musiał J., 2001. Wpływ przebiegu transformacji TWW w EWW na cechy użytkowe łożysk tocznych. Mat. Konf. Kongresu Eksploatacji Maszyn, Krynica, 173-179.
[205] Musiał J., 2003. Badania wpływu wybranych obciążeń zewnętrznych na zmiany geometrii powierzchni roboczych łożysk tocznych. Pr. niepublikowana, ATR Bydgoszcz.
[206] Musiał J., 2006. Influence of operational external loads on changes in surface geometrical structure of kinematic pair elements. Tribologia 3, 143-152.
[207] Musiał J., Styp-Rekowski M., 2004. Surface layer transformation under external extortions. Int. J. Appl. Mech. Eng. 9, 123-128.
[208] Naduvinamani N.B., Fathima S.T., Hiremath P.S., 2003. Hydrodynamic lubrication of rough slider bearings with couple stress fluid. Tribol. Int. 36, 949-959.
[209] Najjar D., Bigerelle M., Iost A., 2003. The computer-based bottstrap method as a tool to select a relevant roughness parameter. Wear 254, 450-460.
[210] Nakonieczny A., 2001. Prognozowanie i badania właściwości mechanicznych warstw powierzchniowych metali. Inżynieria Powierzchni 1, 3-16.
[211] Nayak P.R., 1973. Some aspects of surface roughness measurement. Wear 26, 165-174.
[212] Niemczewska-Wójcik M., 2010. Struktura geometryczna powierzchni ukonstytuowana w procesie obróbki elektroerozyjnej. Tribologia 5, 63-74.
[213] Niemczewska-Wójcik M., 2011. Wpływ wybranych parametrów obróbki elektroerozyjnej na cechy powierzchni obrobionej. Tribologia 6, 151-159.
[214] Niziński S., Żurek J., 2011. Logistyka ogólna. WKŁ Warszawa.
[215] Nogueira I., Dias A.M., Gras R., Progri R., 2002. An experimental model for mixed friction during running-in. Wear 253, 541-549.
[216] Nosal S., 1998. Tribologiczne aspekty zacierania się węzłów ślizgowych. Wyd. Politechniki Poznańskiej.
[217] Nosal S., Grześkowiak J., 2004. Wpływ chropowatości technologicznej na przebieg docierania żeliwnego skojarzenia ślizgowego. Tribologia 4, 71-77.
[218] Nowicki B., 1985. Multiparameter representation of surface roughness. Wear 102, 161-176.
[219] Nowicki B., 1991. Struktura geometryczna: chropowatość i falistość powierzchni. WNT Warszawa.
[220] Nowicki B., 2007. Zaawansowane metody opisu i pomiarów struktury geometrycznej powierzchni. Mechanik 1, 36-41.
[221] Nyc R., Szumniak J., 2001. Wpływ chropowatości elementu metalowego współpracującego z kompozytem zawierającym PTFE na opory tarcia suchego i jego zużywanie. Tribologia 3, 357-364.
[222] Oakham M., 2000. Tails you win. Metalwork. Prod. 11, 67-70.

[223] Oczoś K.E., 1998. Postęp w obróbce skrawaniem II. Obróbka na sucho i ze zminimalizowanym smarowaniem. Mechanik 5-6, 307-318.
[224] Oczoś K.E., Lubimow W., 1998. Sterowanie mechanizmem powstawania chropowatości powierzchni w wybranych procesach obróbkowych. Seminarium projektów badawczych KBN Radom.
[225] Oczoś K.E., Lubimow W., 1999. Klasyfikacja struktur geometrycznych powierzchni (SGP). Pr. Nauk. Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej 74, 149-154.
[226] Oczoś K.E., Liubimow W., 2002. Determinowość i losowość struktur geometrycznych powierzchni (SGP). Pomiary Automatyka Kontrolna 10, 4-6.
[227] Oczoś K.E., Lubimow W., 2003. Struktura geometryczna powierzchni. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
[228] Oczoś K.E., Lubimow W., Łabudzki R., 2000. Zagadnienia morfologiczne kształtowania SGP o charakterze mieszanym. Mat. Międzynarodowej Konf. OM 2000, Kraków, 211-222.
[229] Oczoś K.E., Lubimow W., Łabudzki R., 2001. Izotropowość i symetryczność SGP. Mat. VI Konf. N-T Kształtowanie materiałów niemetalowych, Rzeszów, 293-302.
[230] Ohlsson R., Rosen B.G., Westberg J., 2003. The interrelationship of 3D surface characterisation techniques with standarised 2D techniques. [In:] Advanced Techniques for Assessment Surface Topography, eds. L. Blunt, X. Jiang, Kogan Page, London-Sterling, 198-220.
[231] Olszak W., 2008. Obróbka skrawaniem. WNT Warszawa.
[232] Ozimina D., 2002. Przeciwzużyciowe warstwy wierzchnie w układach tribologicznych. Rozprawy 33, Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce.
[233] Ozimina D., Madej M., 2010. Ocena właściwości jedno- i wielowarstwowych DLC. Tribologia 2, 119-135.
[234] Palasti-Kovacs B., 2003. Surface microtopography in the wear process. Proc. 9th Conf. Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Halmstad, 222-231.
[235] Panicz A., 2000. Chropowatość powierzchni – co nowego? Pomiary Automatyka Kontrola 5, 39-47.
[236] Park K.-H., Olortegui-Yume J., Yoon M.-Ch., Kwon P., 2010. A study on droplets and their distribution for minimum quantity lubrication (MQL). Int. J. Mach. Tool. Manuf. 50, 824-833.
[237] Patir N., Cheng H.S., 1978. An average flow model for determining effects of three-dimensional roughness on partial hydrodynamic lubrication. ASME J. Tribol. 100, 12-17.
[238] Pawlus P., 2006. Topografia powierzchni: pomiar, analiza, oddziaływanie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
[239] Pawlus P., Gałda L., 2007. Oddziaływanie tribologiczne struktury geometrycznej powierzchni. Szóste konwersatorium, Politechnika Poznańska, 9-23.

[240] Peklenik J., 1967. New development in surface characterisation and measurement by means of random process analysis. Proc. Institution of Mechanical Engineers 182, 108-126.
[241] 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.
[242] Peters J., 2001. Contribution of CIRP to the development of metrology and surface quality evaluation during the last fifty years. Ann. CIRP 50, 471-488.
[243] Petropoulos G.P., Vaxevanidis N.M., Pandazaras C.N., Antoniadis A.T., 2003. Shape control of representative turned surfaces textures. Proc. 9th Conf. Metrology and Properties of Engineering Surfaces. Halmstad, 72-73.
[244] Piekoszewki W., 2002. Weryfikacja doświadczalna modeli zużycia tribologicznego w styku smarowym. Zag. Ekspl. Masz. 3, 85-95.
[245] Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszyński W., Wiśniewski M., Wulczyński J., 1996. Badania porównawcze charakterystyk tribologicznych materiałów konstrukcyjnych. Zesz. Nauk. Politechniki Łódzkiej, Mechanika 85, 115-122.
[246] Piekoszewski W., Szczerek M., Wiśniewski M., 2000. Charakterystyki tribologiczne chropowatości powierzchni elementów maszyn. Zag. Ekspl. Masz. 3, 43-69.
[247] Polański Z., 1977. Metody optymalizacji w technologii maszyn. Wyd. Nauk. PWN Warszawa.
[248] Polański Z., 1984. Planowanie doświadczeń w technice. Wyd. Nauk. PWN Warszawa.
[249] Popke H., Emmer Th., Steffenhagen J., 1999. Environmentally clean metal cutting process-Machining on the way to dry machining, Proc. Inst. Mech. Eng. B J. Eng. Manuf. 1, 329-332.
[250] Popov V.L., S.G. Psakhie, 2007. Numerical simulation methods in tribology. Tribol. Int. 40, 916-923.
[251] Pottirayil A., Satish V. Kailas, S.K. Biswas, 2010. Experimental estimation of friction force in lubricated cutting of steel. Wear 269, 557-564.
[252] PN – EN ISO 4957:1999. Stale narzędziowe.
[253] PN – EN ISO 4287: 1999. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
[254] PN – 87/M – 04250: Warstwa wierzchnia. Terminologia.
[255] Praca zbiorowa, 1991. Poradnik Inżyniera. Obróbka skrawaniem. T. I-II, WNT Warszawa.
[256] Pytko S., Pytko P., Furmanik K., 2011. Tribologia smarowania granicznego. Tribologia 5, 189-204.
[257] Pytko S., Szczerek M., 1997. Analiza morfologiczna eksperymentalnych badań tribologicznych. Tribologia 5-6, 454-469.

[258] Raja J., 1983. Field testing of machine tool diagnostic techniques using surface metrology. Ann. CIRP 32, 503-506.
[259] Rigney D.A., Gleaser W.A., 1978. The significance of near surface microstructure in the wear process. Wear 46, 241-250.
[260] Rosen B.G., Ohlsson R., Westberg J., 1995. Interactive surface modelling, an implementation of an expert system for specification of surface roughness and topography. Int. J. Mach. Tool. Manuf. 35, 317-324.
[261] Roy Chowdury S.K., Kaliszer H., Rowe G.W., 1980. An analysis of changes in surface topography during running-in of plain bearings. Wear 44, 170-180.
[262] Roylance B.J., Bovington C.H., Wang G., Hubbard A., 1991 Running-in wear behavior of valve train system. [In:] Vehicle tribology, eds. D. Dowson, C.M. Taylor, M. Godet, Tribology series 18, Elsevier Amsterdam, 143-147.
[263] Sadowski J., 1997. Termodynamiczne aspekty procesów tribologicznych. Wyd. Politechniki Radomskiej.
[264] Sadowski J., 1997. Zagadnienia nieporównywalności wyników badań odporności na zużywanie tribologiczne. Tribologia 5-6, 876-884.
[265] Sadowski J., 2003. The thermodynamic theory of friction and wear. Wyd. Politechniki Radomskiej.
[266] Sadowski J., 2006. Nowa interpretacja i ocena zużycia tribologicznego. Wyd. Politechniki Radomskiej.
[267] Sadowski J., 2008. Sposób oceny liniowej intensywności zużywania. Tribologia 4, 33-40.
[268] Sadowski P., 2009. Model elementarnego procesu zużywania ściernego. Tribologia 4, 179-188.
[269] Sakakura M., Inasaki I., 1992. A neural network approach to the decision-making process for grinding operation. Ann. CIRP 41, 353-356.
[270] Sato H., O-hori M., 1981. Characteristics of two-dimensional surface roughness – taking selfexcited chatter marks as objective. Ann. CIRP 30, 481-486.
[271] Sayles R.S., 2001. How two- and three-dimensional surface metrology data are being used to improve the tribological performance and life of some common machine elements. Tribol. Int. 34, 299-305.
[272] Sayles R.S., Thomas T.R., 1977. The spatial representation of surface roughness by means of the structure function: a practical alternative to autocorrelation. Wear 42, 263-276.
[273] Sęp J., Gałda L., Pawlus P., Koszela W., 2008. Wybrane technologiczne metody zwiększania odporności na zużycie tribologiczne. Tribologia 4, 59-68.
[274] Shaji S., Radhakrishnan V., 2003. Analysis of process parameters in surface grinding with graphite as lubricant based on the Taguchi method. J. Mater. Process. Technol. 141, 51-59.

[275] Sherrington I., Howarth G.E.W., 1997. Approximate numerical models of 3D surface topography generated using sparce frequency domain descriptions. Proc. 7th Conf. Metrology and Properties of Engineering Surfaces. Gothenburg, 199-206.
[276] Sherrington I., Smith E.H., 1988. Fourier models of the surface topography of engineering components. Surf. Topography 1, 11-25.
[277] Sherrington I., Smith E.H., 1990. Areal Fourier analysis of surface topography. Part I: Computational methods and sampling considerations. Surface Topography 3, 43-68.
[278] Sikora J., 1996. Studia nad metodyką badania wytrzymałości zmęczeniowej łożysk ślizgowych poprzecznych. Zesz. Nauk. Politechniki Gdańskiej, Mechanika 74.
[279] Sinha P., Kennedy J.S., Rodkiewicz C.M., Chandra P., Sharma R., Prasad K.R., 1987. Effect of surface roughness and additives in lubrication: generalised Reynolds equation and its application to elastohydrodynamic film. Proc. Inst. Mech. Eng. C J. Mech. Eng. Sci. 201, 1-9.
[280] Sosnovsky L.A., Koreshkov V.N., Yelovoy O.M., 1997. Methods and machines for wear-fatigue tests of materials and their standarization. Proc. 1th World Tribology Congress, London, 723.
[281] Stachowiak G.W., Batchelor A.W., 2001. Engineering tribology. Butterworth-Heinemann Amsterdam.
[282] Stachurski W., Sawicki J., Kaczmarek Ł., 2012. Wpływ czynnika chłodząco-smarującego na stan warstwy wierzchniej zębów kół frezowanych obwiedniowo. Tribologia 1, 147-165.
[283] Stanley H.M., Bogy D.B., 1993. Effect of surface conformity on friction. Wear 168, 105-108.
[284] Stout K.J., Blunt L., 2001. A contribution to the debate on surface classification – random, systematic, unstructured, structured and engineered. Int. J. Mach. Tool. Manuf. 41, 2039-2044.
[285] Stout K.J., Blunt L., Contet P., 1997. The surface characteristics of a grinding wheel and its transfer characteristics. Proc. 7th Conf. Metrology and Properties of Engineering Surfaces. Gothenburg, 366-381.
[286] Stout K.J., Davis E.J., 1986. The specification of surface finish tolerance for the control of manufacture of engineering surfaces. Wear 109, 181-193.
[287] Stout K.J., Davis E.J., Sullivan P.J., 1990. Atlas of machined surfaces. Chapman and Hall London.
[288] Stout K.J., Dong W.P., Mainsah E., 1993. A proposal for standartisation of assessment of three-dimensional micro-topography. Part I. Surface digitisation and parametric characterisation. University of Birmingham.
[289] Stout K.J., King T.G., Whitehouse D.J., 1977. Analytical techniques in surface topography and their application to a running-in experiment. Wear 43, 99-115.

[290] Styp-Rekowski M., 1990. Geometrical constructional features of special rolling bearings against their exploitational properties. Proc. 4th Symp. INTERTRIBO'90 C, Vysoke Tatry, 93-96.
[291] Styp-Rekowski M., 2001. Znaczenie cech konstrukcyjnych dla trwałości skośnych łożysk kulkowych. Wyd. Uczeln. ATR Bydgoszcz, Rozprawy 103.
[292] Styp-Rekowski M., Musiał J., 1997. Kształtowanie cech tribologicznych łożysk specjalnych na poszczególnych etapach działalności inżynierskiej. Tribologia 5-6, 921-928.
[293] Sung I.H., Leem H.S., Kim D.E., 2003. Effect of surface topography on the frictional behavior at the micro-nano scale. Wear 254, 1019-1031.
[294] Svanh A., Kassman-Rudolphi A., Wallen E., 2003. The influence of surface roughness on friction and wear of machine elements coatings. Wear 254, 1092-1098.
[295] Szala J., 1989. Obciążenia i trwałość zmęczeniowa elementów maszyn. Wyd. Uczeln. ATR Bydgoszcz.
[296] Szczerek M., 1997. Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji Radom.
[297] Szczerek M., 2001. Tribologia w nowych obszarach badań i aplikacji. Zag. Ekspl. Masz. 2, 49-60.
[298] Szczerek M., Wiśniewski M. (red.), 2000. Tribologia i tribotechnika. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji Radom.
[299] Szumniak J. Przegląd metod konstytuowania warstwy wierzchniej. Poradnik tribologii i tribotechniki 6, 19-28.
[300] Szumniak J. Warstwa wierzchnia elementów trących. Budowa, własności i ich identyfikacja, wpływ na tarcie. Poradnik tribologii i tribotechniki 4-5, 11-18.
[301] Tamaki J., Kitagawa T., 1995. Evaluation of surface topography of metal-bonded diamond wheel utilizing three-dimensional profilometry. Int. J. Mach. Tool. Manuf. 35, 1339-1351.
[302] Thiele J.D., Melkote S.N., 1999. Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel. J. Mater. Process. Technol. 94, 216-226.
[303] Thomas T.R., 1986. Comparison of scanning electron microscopy and stylus raster measurements of wear. Wear 109, 343-350.
[304] Thomas T.R., 1999. Rough surfaces. Imperial College Press London.
[305] Thomas T.R., Charlton G., 1981. Variation of roughness parameters on some typical manufactured surfaces. Prec. Eng. 3, 91-96.
[306] Thomas T.R., Rosen B.G., Amini N., 1999. Fractal characterisation of the anisotropy of rough surfaces. Wear 232, 41-50.
[307] Toh C.K., 2004. Surface topography analysis in high speed finish milling inclined hardened steel. Prec. Eng. 28, 386-398.

[308] Tomkowski R., Kacalak W., Lipiński D., 2010. Analiza właściwości stereometrycznych powierzchni w procesach mikro- i nanowygładzania. [W:] Podstawy i Technika Obróbki Ściernej, red. A. Gołąbczak, B. Kruszyński, Wyd. Politechniki Łódzkiej, 427-440.
[309] Tonder K., 1987. Effects of skew unidirectional straight roughness on hydrodynamic lubrication. ASME J. Tribol. 109, 671-678.
[310] Torrance A.A., 1997. A simple datum for measurement of the Abbott curve of a profile and its first derivative. Tribol. Int. 30, 239-244.
[311] Tönshoff H.K., Brinksmeier E., 1980. Determination of the mechanical and thermal influences on machined surfaces by microhardness and residual stress analysis. Ann. CIRP 29, 519-530.
[312] Tönshoff H.K., Peters J., Inasaki J., Paul T., 1992. Modelling and simulation of grinding process. Ann. CIRP 41, 677-688.
[313] Trzos M., 2007. Badania eksperymentalne w rozwiązywaniu problemów tribologicznych. Tribologia 3-4, 285-302.
[314] Trzos M., 2011. Wpływ urządzenia badawczego i parametrów procesu tarcia na rozrzut zużycia. Tribologia 2, 169-179.
[315] Trzos M., 2011. Zmienność wyników w zagadnieniach powtarzalności i odtwarzalności wyznaczenia charakterystyk tribologicznych. Tribologia 6, 227-239.
[316] Tubielewicz K., 1993. Analiza naprężeń powstających w warstwy wierzchniej podczas procesu nagniatania. Wyd. Politechniki Częstochowskiej.
[317] Wakabayashi T., Suda S., Inasaki I., Terasaka K., Musha Y., Toda Y., 2007. Tribological Action and Cutting Performance of MQL Media in Machining of Aluminum. Ann. CIRP 56, 97-100.
[318] Wang X., Wong P.L., Zhang Z., 2000. Experimental study of the real time change in surface roughness during running-in for PEHL contact. Wear 244, 140-146.
[319] Weck M., Brecher C, Hanrath G., 1996. Probleme auf dem Weg zur olfreien Werkzeugmaschine. Spanendes Trockenbearbeiten. Technische Rundschau 48, 22-24.
[320] Wei G., Scott W., 1995. The influence of surface roughness on the results of the Timken lubricant extreme pressure test. Int. J. Mach. Tool. Manuf. 35, 357-361.
[321] Weinert K., Inasaki I., Sutherland J.W., Wakabayashi T., 2004. Dry machining and minimum quantity lubrication. Ann. CIRP 53, 511-537
[322] Whitehouse D.J., 1994. Handbook of surface metrology. Institute of Physics Bristol-Philadelphia.
[323] Whitehouse D.J., 1998. Process and quality control using surface finish. Proc. 6th Symp. IMEKO Metrology for quality control in production, Vienna, 699-710.
[324] Whitehouse D.J., 2001. Surfaces and their measurement. Hermes Penton London.

[325] Whitehouse D.J., Archard J.F., 1970. The properties of random surface of significante in their contact. Proc. R. Soc. A 316, 97-121.
[326] Wieczorowski M., 1996. Stereometryczna ocena porównawcza powierzchni przy zastosowaniu różnych układów odniesienia profilometrów. Pr. niepublikowana, Politechnika Poznańska.
[327] Wieczorowski M., 2009. Wykorzystanie analizy topograficznej w pomiarach nierówności powierzchni. Rozprawy 429, Wyd. Politechniki Poznańskiej.
[328] Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J., 1996. Charakterystyka chropowatości powierzchni. Wyd. Politechniki Poznańskiej.
[329] Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J., 2003. Przewodnik po pomiarach nierówności powierzchni czyli o chropowatości i nie tylko. Wyd. Politechniki Poznańskiej.
[330] Wieczorowski M, Cellary A., Chajda J., Kolasiński W., 1995. Three dimensional analysis of random surfaces. Proc. 6th Conf. DAAAM, Kraków, 365-366.
[331] Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J., Kolasiński W., 1996. Three dimensional analysis of periodic surfaces. Proc. 7th Conference DAAAM, Wien, 485-486.
[332] Williams J., 2005. Engineering tribology. Cambridge University Press Cambridge.
[333] Willis E., 1986. Surface finish in relation to cylinder liners. Wear 109, 351-366.
[334] Wiśniewski M. Parametry chropowatości powierzchni. Poradnik tribologii i tribotechniki 2, 5-6.
[335] Wong Y.S., Nee A.Y.C., Nee X.Q., Li X.Q., Reisdorf C., 1997. Tool condition monitoring using laser scattering. J. Mater. Process. Technol. 63, 205-210.
[336] Woropay M. (red.), 1996. Podstawy racjonalnej eksploatacji maszyn. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji Radom.
[337] Woropay M., Landowski B., Jaskulski Z., 2004. Wybrane problemy eksploatacji i zarządzania systemami technicznymi. Wyd. Uczeln. ATR Bydgoszcz.
[338] Wrede F., 1978. Theoretische und Experimentelle Studien der Schmiervarhaltnisse am System Kolben-Kolbenring-Zylinder. PhD Dissertation, TH Hannover.
[339] Wu C., Zheng L., 1988. A general expression for plasticity index. Wear 121, 161-172.
[340] Varadarajan A.S., Philip P.K., Ramamoorthy B., 2002. Investigations on hard turning with minimal cutting fluid application (HTMF) and its comparison with dry wet turning. Int. J. Mach. Tool. Manuf. 42, 193-200.
[341] Vorburger T.V., Dixson R.G., Tsai V., Doi T., Song J.F., Renegar T.B., Fu J., 1998. Problems in surface metrology. Int. J. Mach. Tool. Manuf. 38, 417-418.

[342] Xiao L., Rosen B.-G., Amini N., 1993. Surface lay effect on rough friction in rolling contact. Proc. 9th Int. Conf. on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Halmstad, 195-203.
[343] Zaborowski T., 2002. Aspekty technologiczne oddziaływania procesu wytwarzania na kształtowanie warstwy wierzchniej zębów kół zębatych. Wyd. Instytutu Badań i Ekspertyz Naukowych w Gorzowie Wlkp. Studia i Materiały 1.
[344] Zaborowski T., 2006. Znaczenie ściernicy i warunków obróbki dla kształtowania warstwy wierzchniej w zębach kół zębatych. Zesz. Nauk. Politechniki Rzeszowskiej, Mechanika 69, 278-295.
[345] Zaborowski T., 2011. Zjawiska fizyczne wpływające na naprężenia w technologicznej warstwie wierzchniej kół zębatych. [W:] Warstwa wierzchnia technologicznie kształtowana, red. L. Dąbrowski, T. Zaborowski, Wyd. Instytutu Badań i Ekspertyz Naukowych w Gorzowie Wlkp., 204-218.
[346] Zaborowski T., Bomba G., Ochenduszko R., 2011. Docieranie ewolwentowych uzębień przekładni lotniczych. [W:] Technologia kształtowania warstwy wierzchniej, red. T. Zaborowski, Wyd. Instytutu Badań i Ekspertyz Naukowych w Gorzowie Wlkp., 94-99.
[347] Zahouani H., 1998. Spectral and 3D motifs identification of anisotropic topographical components. Analysis and filtering of anisotropic patterns by morphological rose approach. Int. J. Mach. Tool. Manuf. 38, 615-623.
[348] Zahouani H., Assoul M., Vargiolu R., Mathia T., 2001. The morphological tree transform of surface motifs. Int. J. Mach. Tool. Manuf. 41, 1961--1979.
[349] Zakościelny St., 1981. Wpływ kierunkowości śladów obróbki oraz sposobu wytwarzania na ścierność i ścieralność honowanej powierzchni na przykładzie siłowników hydraulicznych. Pr. niepublikowana, Politechnika Śląska Gliwice.
[350] Zaleski K., 2007. Wpływ cieczy obróbkowej na wybrane właściwości warstwy wierzchniej ukształtowanej w procesie kulkowania. Tribologia 5, 157-167.
[351] Zawada-Tomkiewicz A., Storch B., 2008. Analiza obrazu powierzchni obrobionej w obróbce na sucho ostrzami o modyfikowanej geometrii. Mat. Szkoły Obróbki Skrawaniem Obróbka Skrawaniem – Innowacje, Kraków, 320-327.
[352] Zhou G.Y., Leu M.C., Dong S.X., 1990. Measurement and assessment of topography of machined surfaces. ASME PED 46, 89-100.
[353] Zhu H., Ge S., Huang X., Zhang D., Liu J., 2003. Experimental study on the characterization of worn surface topography with characteristic roughness parameter. Wear 255, 309-314.
[354] Zwierzycki W., Grądkowski M. (red.), 2000. Fizyczne podstawy doboru materiałów na elementy maszyn współpracujących tarciowo. Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji Radom.

[355] Żarski T., 2003. Obróbka na sucho stopów magnezu. Zesz. Nauk. Politechniki Rzeszowskiej, Mechanika 61, 177-182.
[356] Żółtowski B., Cempel Cz. (red.), 2004. Inżynieria diagnostyki maszyn. Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji Radom.
[357] Żurek K., Slawik J., Subbotko R., 2008. Chłodzenie mgłą olejową – porównanie aspektów technicznych i ekonomicznych z technologią tradycyjną na przykładzie obróbki kutych wałów korbowych. Mat. Szkoły Obróbki Skrawaniem Obróbka Skrawaniem – Innowacje, Kraków, 84-93.
[358] Żurowski W., Sadowski J., 2001. Badania maksymalnej odporności układów ciał metalicznych na zużywanie. Cz. II. Badania eksperymentalne maksymalnej odporności na zużywanie tribologiczne i wybranych cech warstwy wierzchniej. Inżynieria Powierzchni 1, 41-55.

KIERUNKOWOŚĆ STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI W TRANSFORMACJI WARSTWY WIERZCHNIEJ

Streszczenie

Cechy warstwy wierzchniej, a w szczególności struktury geometrycznej powierzchni ukonstytuowanej w procesie technologicznym, determinują cechy użytkowe wytworzonego elementu. Od cech warstwy wierzchniej zależy przebieg i intensywność procesu zużywania. Własności i właściwości warstwy wierzchniej z kolei są uzależnione od zastosowanych warunków obróbki w tym jej rodzaju i wynikającej z tego kinematyki, parametrów oraz sposobu chłodzenia i smarowania strefy skrawania.

Znając relacje między stanem warstwy wierzchniej a przebiegiem procesu zużywania, można właściwie ukierunkować proces wytwórczy, aby uzyskać pożądane – optymalne cechy użytkowe elementów tworzących parę cierną przy kryteriach tribologicznych.

Z uwagi na to, że istotny wpływ na cechy użytkowe elementów par ciernych, szczególnie przy styku konforemnym, ma ukształtowanie struktury powierzchni, istotny jest właściwy dobór metod i narzędzi do oceny cech stereometrycznych powierzchni. Zastosowane pomiary metrologiczne topografii powierzchni powinny w jak największym stopniu odzwierciedlać rzeczywistą rzeźbę struktury, co umożliwi z kolei właściwą ocenę cech użytkowych elementów par ciernych.

W pracy do oceny cech struktury geometrycznej powierzchni wynikających ze sposobu rozmieszczenia charakterystycznych śladów obróbki, przyjęto stopień izotropowości ich ukierunkowania.

Przeprowadzone badania doświadczalne zweryfikowały przydatność zastosowania do opisu cech użytkowych elementów par ciernych stopnia izotropowości ich struktury powierzchni. Przedmiotem badań była również analiza wpływu warunków współpracy elementów tworzących parę kinematyczną na zmiany stopnia izotropowości ich struktur.

Na podstawie uzyskanych wyników badań doświadczalnych opracowano modele predykcyjne opisujące zaobserwowane zmiany podczas transformacji warstwy wierzchniej.

W pracy zawarto również wstępną weryfikację wpływu ilości lub braku cieczy chłodząco-smarującej na konstytuowane w procesie technologicznym ukształtowanie struktury powierzchni. Zweryfikowano ten wpływ, a struktury uzyskane przy minimalnym chłodzeniu i smarowaniu – ze względu na najmniejsze wartości parametrów chropowatości – przyjęto do badań głównych.

Zakończenie pracy stanowią wnioski podzielone na trzy grupy: o charakterze poznawczym, utylitarnym oraz określające kierunki proponowanych przyszłych badań.

TEXTURE DIRECTION OF SURFACE GEOMETRICAL STRUCTURE IN TRANSFORMATION SURFACE LAYER

Summary

The sights of the surface layer, and in the peculiarity the geometrical structure of surface formed during technological process determine the usable features of the produced unit. The course and the intensity of the waste process depends from the sights of these layer. The properties and the quality of surface layer are conditioned from applied processing conditions and resulting from that conditions features as kinematics, parameters and the way of cooling and oiling of machining zone.

Knowing the relationships between the condition of surface layer and the waste process course it could be properly guide the productive process to obtain desirable – optimum usable features of units that creates the friction pair with set tribology criteria.

In attention on this, that significant influence on the usable sights of the friction pairs units, particularly near conformal point of contact, has the surface layer structure formation, the proper selection of methods and tools to the opinion of the surface stereometric sights. Applied metrology measurements of the surface topography should in largest stage reflecting the real cut of the layer what will make possible to proper opinion establish of the usable features of friction pairs units.

In present work to the opinion of the geometrical structure sights resulting from the way of the characteristic spurs of the processing distribution, their isotropy steering stage was accepted.

Conducted experimental investigations verified the usefulness of the use to the description of friction pair units usable features the isotropy stage of their surface layer. The object of investigations was also the analysis of the co-operation elements of kinematics units condition influence on the stage of isotropic structure changes.

Basis on the obtained results of experimental investigations the prediction models were elaborate that describing observed changes during transformation of surface layer.

In the work were also contained preliminary verifications of the amount or lack of cooling-oiling liquid influence on the constituted in the technological process form of the surface layer. This influence was verify, and obtained structures with minimal cooling and oiling value in consideration of the minimum roughness parameters values were accept to the main audits.

The whole of the work close conclusions divided on three groups with the cognitive, utilitarian character and specifying the directions of proposed future investigations.