

**INSTYTUT TECHNOLOGII MASZYN
I AUTOMATYZACJI
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ**

Na prawach rękopisu

ROZPRAWA DOKTORSKA

**Metodyka wyboru parametrów
chropowatości
do opisu topografii powierzchni**

Maciej KOWALSKI

Promotor:

dr hab. inż. Piotr CICHOSZ, prof. ndzw. PWr

– Wrocław 2005 –

SPIS TREŚCI

TYTUŁ ROZDZIAŁU	str.
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI I AKRONIMÓW	4
1. WPROWADZENIE	6
2. WARSTWA WIERZCHNIA	9
3. STAN ZAGADNIENIA	15
3.1. KLASYFIKACJA STRUKTUR GEOMETRYCZNYCH POWIERZCHNI	15
3.2. MODELOWANIE CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI	23
4. TEZY, CEL I ZAKRES PRACY	37
5. MODELOWANIE POWIERZCHNI	39
5.1. WPROWADZENIE	39
5.2. METODYKA MATEMATYCZNEGO MODELOWANIA TOPOGRAFII POWIERZCHNI	42
5.3. OPROGRAMOWANIE DO MODELOWANIA POWIERZCHNI	46
5.3.1. MOŻLIWOŚCI MODELOWANIA PROFILI 2D I POWIERZCHNI 3D.....	46
5.3.2. MODELOWANIE SKANOWANIA POWIERZCHNI ZA POMOCĄ IGŁY POMIAROWEJ	49
5.3.3. WERYFIKACJA DZIAŁANIA PROGRAMU	54
5.3.3.1. PORÓWNANIE TOPOGRAFII POWIERZCHNI LOSOWYCH - RZECZYWISTYCH I MODELOWYCH	55
5.3.3.2. PORÓWNANIE TOPOGRAFII POWIERZCHNI ZDETERMINOWANYCH – RZECZYWISTYCH I MODELOWYCH	57
5.3.3.3. PORÓWNANIE TOPOGRAFII POWIERZCHNI PŁASKOWIERZCHOŁKOWYCH TYPU „PLATEAU” – RZECZYWISTYCH I MODELOWYCH	59
6. KLASYFIKACJA STRUKTUR GEOMETRYCZNYCH POWIERZCHNI	63
7. ANALIZA PRZYDATNOŚCI PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OPISU MODELI TOPOGRAFII POWIERZCHNI	69
7.1. METODYKA BADAWCZA	69
7.1.1. WSKAŹNIKI OCENY PRZYDATNOŚCI PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OPISU CECH GEOMETRYCZNYCH MODELI TOPOGRAFII POWIERZCHNI.....	69

7.2. WSKAŹNIKI I PARAMETRY ZASTOSOWANE DO OPISU CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI	71
7.2.1. PARAMETRY CHROPOWATOŚCI PROFILU 2D	71
7.2.1.1. PARAMETRY AMPLITUDOWE	72
7.2.1.2. PARAMETRY HYBRYDOWE	74
7.2.1.3. PARAMETRY DŁUGOŚCIOWE	75
7.2.1.4. PARAMETRY ODCZYTANE Z KRZYWEJ UDZIAŁU MATERIAŁOWEGO	76
7.2.2. PARAMETRY CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI 3D	77
7.2.2.1. PARAMETRY AMPLITUDOWE	78
7.2.2.2. PARAMETRY PRZESTRZENNE	79
7.2.2.3. PARAMETRY POWIERZCHNIOWE I OBJĘTOŚCIOWE	80
7.2.2.4. PARAMETRY HYBRYDOWE	81
7.2.2.5. PARAMETRY FUNKCJONALNE	81
7.3. MODELE POWIERZCHNI Z CIĄGŁYMI ŚLADAMI KSZTAŁTOWANIA, NIE KRZYŻUJĄCYMI SIĘ, RÓWNOLEGŁYMI	83
7.3.1. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ ZMIENNĄ WIELKOŚCIĄ KROKU KE WZDŁUŻ OSI X	83
7.3.2. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ ZMIENNĄ WYSOKOŚCIĄ KE	87
7.3.3. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ ZAKŁÓCENIAMI POŁOŻENIA KE WZDŁUŻ OSI X	91
7.3.4. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ ZAKŁÓCENIAMI POŁOŻENIA KE W OSI Z	95
7.3.5. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ ZMIENNĄ WIELKOŚCIĄ ZASZUMIENIA KE	99
7.4. MODELE POWIERZCHNI Z CIĄGŁYMI ŚLADAMI KSZTAŁTOWANIA, KRZYŻUJĄCYMI SIĘ, PROSTOLINIOWYMI, O STAŁYM KĄCIE PRZECIĘCIA RYS	103

7.4.1. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ ZMIANAMI KĄTA PRZECIĘCIA ŚLADÓW	103
7.4.2. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ ZMIENNĄ WIELKOŚCIĄ ŚCIĘCIA POWIERZCHNI	105
7.5. MODELE POWIERZCHNI Z CIĄGŁYMI ŚLADAMI KSZTAŁTOWANIA, KRZYŻUJĄCYMI SIĘ, KRZYWOLINIOWYMI, SINUSOIDALNYMI	108
7.5.1. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ ZMIENNĄ AMPLITUDĄ DRGAŃ W PŁASZCZYŹNIE X-Y	108
7.5.2. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ ZMIENNĄ ILOŚCIĄ OKRESÓW DRGAŃ W PŁASZCZYŹNIE Y-Z	111
7.6. MODELE POWIERZCHNI Z DYSKRETNymi ŚLADAMI KSZTAŁTOWANIA, BEZKIERUNKOWYMI	114
7.6.1. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ RÓŻNĄ LICZBĄ DYSKRETNych ŚLADÓW KSZTAŁTOWANIA	114
7.6.2. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ ZMIENNĄ WIELKOŚCIĄ KE	117
7.6.3. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ ZMIENNĄ WIELKOŚCIĄ ZASZUMIENIA KE	120
8. WNIOSKI	122
9. LITERATURA	124

Wykaz ważniejszych symboli i akronimów:

Symbole

a_p	– głębokość skrawania
C	– poziom przekroju chropowatości profilu
f	– posuw
I_z	– współczynnik anizotropowości struktury geometrycznej powierzchni
l_n	– odcinek pomiarowy
l_r	– odcinek elementarny
$M \cdot N$	– wielkość macierzy próbkowania
r_ϵ	– promień zaokrąglenia naroża
$R(JIS)$	– wysokość chropowatości według 10 punktów
R_a	– średnia arytmetyczna wartości rzędnych profilu chropowatości
R_c	– średnia wysokość elementów profilu chropowatości
$RHSC$	– liczba miejscowych wzniesień profilu przypadających na odcinek elementarny
RKP	– promień końcówki pomiarowej
Rku	– współczynnik nachylenia profilu chropowatości
RLo	– długość rozwinięta profilu
Rmr	– względny udział materiałowy
$Rmr(C)$	– udział materiałowy profilu
R_p	– wysokość najwyższego wzniesienia profilu chropowatości
RP_c	– liczba miejscowych wzniesień profilu
R_q	– średnia kwadratowa rzędnych profilu chropowatości
RS	– średni odstęp miejscowych wzniesień profilu
Rsk	– współczynnik asymetrii profilu chropowatości
RS_m	– średnia szerokości rowków elementów profilu chropowatości
R_t	– całkowita wysokość profilu chropowatości
R_v	– głębokość najgłębszego wgłębienia profilu chropowatości
RV_o	– objętość olejowa
R_z	– największa wysokość profilu chropowatości
$R\Delta a$	– średnie arytmetyczne pochylenie profilu chropowatości
$R\delta c$	– różnica między dwoma poziomami cięcia
$R\Delta q$	– średni kwadratowy wznios profilu chropowatości
$R\lambda q$	– średnia kwadratowa długość fali profilu chropowatości
r_ϵ	– promień zaokrąglenia naroża
S_a	– średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni
S_{al}	– długość odcinka najszybszego zanikania funkcji autokorelacji powierzchni
S_{bi}	– wskaźnik nośności
S_{ci}	– wskaźnik zatrzymania cieczy przez rdzeń
S_{dr}	– rozwinięcie powierzchni

Sds	– gęstość wierzchołków nierówności powierzchni
Sfd	– wymiar fraktalny chropowatości powierzchni
$SHTp$	– wysokość obszaru nośności
sKd	– poziom determinowości struktury geometrycznej powierzchni
Sku	– współczynnik skupienia
$Smmr$	– średnia objętość materiału
$Smvr$	– średnia objętość pustek
Sp	– maksymalna wysokość wzniesienia powierzchni
SPc	– gęstość wzniesień pomiędzy określonymi przekrojami
Sq	– średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni
Ssc	– średnia arytmetyczna krzywizny wierzchołków nierówności powierzchni
Ssk	– współczynnik asymetrii
St	– wysokość nierówności powierzchni
Std	– kierunek tekstury powierzchni
STp	– udział nośny na zadanej wysokości powierzchni
Str	– wskaźnik tekstury powierzchni
Sv	– maksymalna głębokość wgłębienia powierzchni
Svi	– wskaźnik zatrzymania cieczy przez wgłębienia
Sz	– dziesięciopunktowa wysokość nierówności powierzchni
$S\Delta q$	– średnie kwadratowe nachylenie nierówności powierzchni
t	– współczynnik zmiany wartości parametru chropowatości
αKP	– kąt wierzchołkowy igły odwzorowującej profilografometru
$\Delta x, \Delta y$	– odstęp próbkowania
$\eta(x,y)$	– powierzchnia resztkowa (szczątkowa)
$\eta(x_p, y_p)$	– powierzchnia nośna
ρ	– współczynnik korelacji

Akronimy

2D	– układ dwuwymiarowy
3D	– układ trójwymiarowy
AWJM	– Abrasive Water Jet Machining – obróbka wysokociśnieniową strugą wody
ChP	– chropowatość powierzchni
EWV	– Eksploatacyjna Warstwa Wierzchnia
KE	– Kształt Elementarny
OUPN	– układ Obrabiarka–Uchwyt–Przedmiot–Narzędzie
SGP	– Struktura Geometryczna Powierzchni
TWW	– Technologiczna Warstwa Wierzchnia
WW	– Warstwa Wierzchnia

1. WPROWADZENIE

Jakość technologicznej warstwy wierzchniej, konstytuowanej w procesie skrawania, należy do podstawowych problemów w technologii maszyn.

W nowoczesnych technikach wytwarzania celem nadrzędnym jest uzyskanie dobrej, powtarzalnej jakości wyrobów. Jednym z głównych problemów, który się z tym wiąże, jest jakość warstwy wierzchniej przedmiotu obrobionego. Łączy ona w sobie całokształt zagadnień dotyczących sposobów wytwarzania powierzchni, spełniających określone wymagania eksploatacyjne.

Wieloletnie doświadczenia z różnych dziedzin wykazały, że istnieją silne związki między stanem warstwy wierzchniej a zdolnością do spełniania określonych funkcji użytkowych przez elementy maszyn. Integralną częścią warstwy wierzchniej jest jej powierzchnia zewnętrzna, której budowę określa struktura geometryczna powierzchni (SGP).

Opisując strukturę geometryczną powierzchni można czynić to na różnych poziomach, od makroskopowego przez mikroskopowy do submikroskopowego. Poziom makroskopowy obejmuje falistość i niektóre wady powierzchni. Na poziomie mikroskopowym rozpatrywana jest typowa – występująca w budowie maszyn – chropowatość powierzchni (ChP). Na poziomie submikroskopowym rozpatrywana jest chropowatość niektórych elementów, np.: urządzeń optycznych stosowanych w technice laserowej, nanotechnologiach.

Pomiary i badania struktury geometrycznej powierzchni mogą służyć różnym celom, z których najważniejszymi są:

- sprawdzenie zgodności efektu technologicznego z założeniami konstrukcyjnymi opartymi na doświadczeniach eksploatacyjnych,
- poznanie struktury geometrycznej powierzchni i warunków styku dwóch powierzchni,
- określenie związków między metodą wytwarzania, w wyniku której ukształtowana zostaje warstwa wierzchnia, a możliwością spełniania przez powierzchnie założonych funkcji użytkowych.

Pomiary struktury geometrycznej powierzchni występują w zagadnieniach:

- konstrukcyjnych – pomiary prototypów, wzorów konstrukcyjnych itp.,
- technologicznych – kontrola techniczna, badania wpływu sposobów i parametrów obróbki na stan powstającej warstwy wierzchniej,
- eksploatacyjnych – badania wpływu struktury geometrycznej powierzchni na właściwości użytkowe maszyn.

Rozwój metrologii struktury geometrycznej powierzchni jest obecnie znacznie szybszy i wszechstronniejszy od innych dziedzin metrologii np. długości i kąta [74]. Wskazuje na to dynamiczny rozwój takich dziedzin nauki, jak: trybologia, optyka, itp., które nie sformułowały

jeszcze ostatecznych wymagań dotyczących opisu i pomiarów struktury geometrycznej powierzchni.

Oddziaływania struktury geometrycznej na cechy funkcjonalne powierzchni maszyn należy rozpatrywać poczynając od oddziaływań typu globalnego, np. oporów tarcia, zużycia, poprzez lokalne, dotyczące zjawisk w obszarach konturowych powierzchni styku, aż do skali atomowej związanej z submikronierównościami. Oddziaływania te mają charakter systemowy, np. w procesie tarcia chropowatość powierzchni, własności materiałów i ośrodka oraz parametry ruchu wpływają na opory tarcia i zużycie powierzchni, które z kolei zmieniają własności warstwy wierzchniej, co sprawia, że technologiczna warstwa wierzchnia (TWW) staje się eksploatacyjną (trybologiczną).

Topografia powierzchni elementów maszyn jest jednym ze znaczących czynników, mających wpływ na jakość warstwy wierzchniej powierzchni funkcjonalnych. Obecny stan wiedzy nie zawsze pozwala na jednoznaczne skorelowanie topografii powierzchni z jej późniejszymi cechami eksploatacyjnymi [107].

Metrologia struktury geometrycznej powierzchni, a w szczególności metrologia chropowatości, obejmuje bardzo szeroki wachlarz zagadnień związanych z matematycznym opisem i modelowaniem powierzchni oraz opracowaniem nowych metod pomiarów i analizy struktury geometrycznej powierzchni. Dziedzina ta rozwija się obecnie bardzo dynamicznie, a wynika to z:

- konieczności coraz to wszechstronniejszej identyfikacji bardzo złożonego obiektu, jakim jest struktura geometryczna powierzchni,
- potrzeby określenia nowych cech chropowatości powierzchni, które decydują, bądź mogą decydować, o tak specyficznych właściwościach części maszyn jak: zużycie, odbicie bądź pochłanianie fal elektromagnetycznych itp.,
- rozwoju wielu działów fizyki, np. optyki, które stanowią inspirację do opracowania nowych metod pomiaru struktury geometrycznej powierzchni,
- upowszechnienia techniki mikroprocesorowej, dzięki której możliwe stało się szybkie wyznaczanie wartości liczbowych dużej liczby parametrów oraz statystyczne opracowanie wyników pomiarów.

Mając na uwadze szczególne znaczenie topografii powierzchni, prowadzi się na szeroką skalę badania mające doprowadzić do poprawienia dokładności przeprowadzonych pomiarów. Otrzymywane, w wyniku pomiarów, tablicowe zbiory danych opisujące współrzędne profilu bądź powierzchni chropowatości można, dzięki technice komputerowej, poddawać analizie za pomocą dowolnych parametrów matematycznych [10]. Stan taki prowadzi do zwielokrotnienia liczby stosowanych filtrów, długości odcinków pomiarowych czy odcinków elementarnych, co z kolei powoduje znaczne

zwiększenie liczby różnych wartości otrzymywanych parametrów chropowatości do opisu topografii powierzchni. Wielość parametrów powoduje rozliczne dyskusje nad celowością i poprawnością ich stosowania [46], [49], [87], [97].

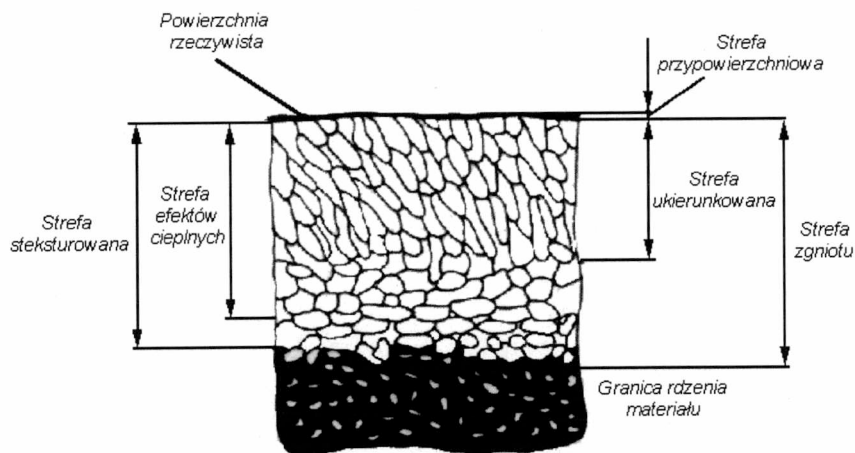
Pomimo dużej liczby znanych parametrów chropowatości jedynie niektóre z nich można powiązać z cechami funkcjonalnymi powierzchni. Cechy te są dotychczas często oceniane na podstawie subiektywnego odczucia osoby analizującej wyniki. Odczuwalny jest brak parametrów chropowatości jednoznacznie opisujących badaną, określoną cechę powierzchni, a wiedza zdobyta w tym obszarze działań nie jest dostatecznie wykorzystywana w rozwiązaniach praktycznych, mających rzeczywisty wpływ na jakość wytwarzanych wyrobów.

Ocena właściwości funkcjonalnych wytwarzanej powierzchni wymaga prowadzenia szczegółowej analizy wpływu zastosowanego rodzaju obróbki na otrzymane cechy geometryczne. Poprawny wybór rodzaju obróbki, wraz z właściwym doborem procedury pomiarowej, umożliwi sterowanie obróbką, w celu uzyskania warstwy wierzchniej o ściśle wymaganych właściwościach.

2. WARSTWA WIERZCHNIA

Każde oddziaływanie energii na ciała stałe, a więc i na elementy maszyn, pozostawia na powierzchni, i w bezpośrednio pod nią położonej płytkiej warstwie materiału, zwanej warstwą wierzchnią (WW), ślady w postaci zmian jej struktury i właściwości. Struktura ta i jej właściwości są inne niż struktura i właściwości rdzenia materiału. Warstwa ta tworzy powłokę związaną z metalem siłami kohezji, nie jest jednolita, lecz składa się z odrębnych stref o niejednakowej strukturze i właściwościach. Zasięg warstwy wierzchniej w głąb rdzenia materiału nie jest równomierny. Struktura i właściwości warstwy wierzchniej decydują o zachowaniu się elementów maszyn w czasie ich użytkowania. Budowę warstwy wierzchniej pokazano na rys.2.1. Składa się ona ze:

- strefy przypowierzchniowej, która jest częścią warstwy wierzchniej bezpośrednio sąsiadującą z powierzchnią. W jej skład wchodzi zaadsorbowane lub związane chemicznie jony z otoczenia lub elementu współpracującego,
- strefy ukierunkowanej, stanowiącej część strefy zgniotu o wyraźnym ukierunkowaniu ziaren,
- strefy efektów cieplnych, tej części strefy zgniotu, w której zmiany wywołane są oddziaływaniem procesów cieplnych (przemiany fazowe, zmiany wielkości ziaren),
- strefa stekstrowanej, o uprzywilejowanej orientacji kryształów lub ziaren.
- strefy zgniotu, w której nastąpiło odkształcenie plastyczne. Obejmuje ona trzy wcześniej wymienione strefy.



Rys.2.1. Schemat uproszczonego modelu warstwy wierzchniej [117]

Cechy warstwy wierzchniej, tzn. struktura i właściwości, nadawane jej w wyniku obróbki przedmiotu, zależą przede wszystkim od rodzaju tej obróbki – od technologii kształtującej

przedmiot (ubytkowej i bezubytkowej) oraz od technologii nadającej powierzchni specjalne właściwości fizykochemiczne.

Granica wewnętrzna warstwy wierzchniej jest teoretyczną granicą wyznaczoną przez punkty, w których występują wartości graniczne tej spośród cech warstwy wierzchniej, dla której grubość warstwy wierzchniej określona w ten sposób jest największa. Wyznaczenie granicy wewnętrznej warstwy wierzchniej jest bardzo trudne i w większości przypadków ma charakter przybliżony, ponieważ granica wewnętrzna, będąca najczęściej płaszczyzną dwuwymiarową, praktycznie nie istnieje [9].

Struktura i grubość warstwy wierzchniej metalu zależy od właściwości plastyczno-sprężystych tego metalu, od warunków skrawania i rodzaju narzędzia skrawającego oraz od sposobu obróbki (na sucho, czy w obecności płynu obróbkowego) i jej intensywności. Obróbka zgrubna skrawaniem powoduje powstanie grubszej warstwy wierzchniej o większym zgnioście i naprężeniach własnych niż po obróbce wykańczającej, która w pewnym stopniu usuwa wady obróbki zgrubnej.

W przypadku kształtowania skrawaniem WW, głównym składnikiem struktury geometrycznej powierzchni (SGP) są nierówności powierzchni będące, w głównej mierze, odwzorowaniem ruchu i geometrii ostrza narzędzia skrawającego [9]. Struktura geometryczna powierzchni obejmuje chropowatość, falistość, błędy kształtu i wady powierzchni oraz wzajemne ich relacje. Niektóre normy nie zaliczają do elementów SGP błędów kształtu dlatego, że mają one wiele wspólnych cech z błędami położenia i należą do klasycznej metrologii długości i kąta.

W procesach wytwarzania bądź eksploatacji, powierzchnie rzeczywiste są kształtowane w wyniku równoczesnego oddziaływania wielu czynników, o różnej intensywności i zasięgu. Przechodząc od oddziaływań typu globalnego, poprzez skalę makro-, mezo-, i mikroskopową do atomowej, można wyodrębnić poszczególne składowe tych oddziaływań oraz ich skutki w postaci nierówności powierzchni. W procesach obróbki skrawaniem odkształcenia układów obrabiarka-uchwyt-przedmiot-narzędzie (OUPN) oraz niedokładność wykonania lub zużycie powierzchni roboczych łóż, suportów i przyrządów obróbkowych są powodem powstawania nierówności obejmujących swym zasięgiem całą lub znaczną część obrobionej powierzchni. Nierówności te, nazywane błędami kształtu i położenia, charakteryzują się tym, że ich odstęp jest większy od odstępów falistości.

Wynikiem cyklicznych zmian wzajemnego położenia przedmiotu i narzędzia, powodowanych zwykle przez drgania układu OUPN, jest powstawanie falistości, tj. nierówności powierzchni charakteryzujących się odstępem nierówności znacznie większym niż chropowatość, a mniejszym od długości odcinka pomiaru falistości oraz kształtem zbliżonym do sinusoidalnego. Falistość powstaje wskutek oddziaływania drgań,

zarówno swobodnych, jak i wymuszonych i może być efektem nakładania się na siebie drgań o różnych amplitudach, okresach oraz przesunięciach fazowych. Chropowatość powierzchni stanowi zbiór nierówności, których wysokość może wynosić od angstromów do milimetrów. Główną składową chropowatości powierzchni kształtowanych skrawaniem stanowi kinematyczno-geometryczne odwzorowanie wierzchołka lub wierzchołków ostrzy [9], [32], [42], [44], [74], [93]. Poza tym na chropowatość wpływa wiele dodatkowych czynników, jak:

- procesy dekohezji,
- zużycie i szczyrbałość krawędzi skrawającej,
- odkształcenia plastyczne w strefie skrawania i tworzenie segmentów wióra,
- tarcie powierzchni przyłożenia narzędzia o powierzchnię obrobioną,
- budowa krystaliczna metali,
- tarcie wióra o powierzchnię obrobioną [32].

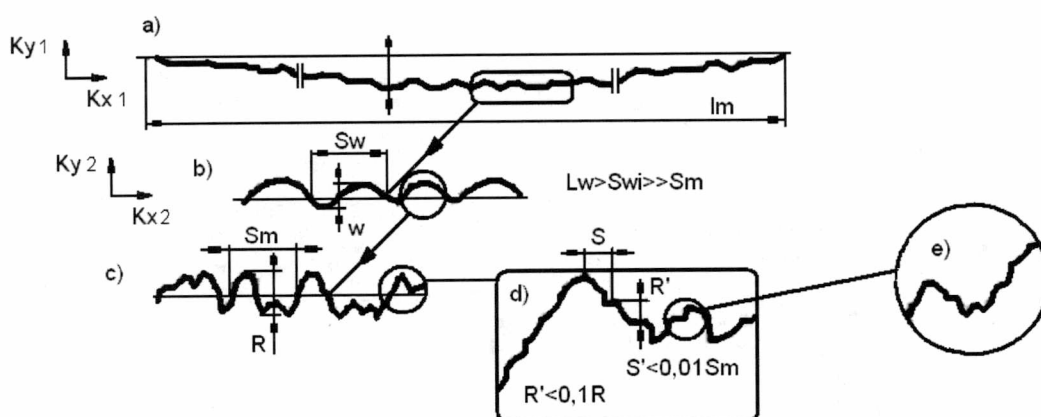
W zależności od wartości stosunku długości fali nierówności S do jej wysokości R rozróżniamy:

a) chropowatość powierzchni, gdy $\frac{S}{R} < 50$; (2.1)

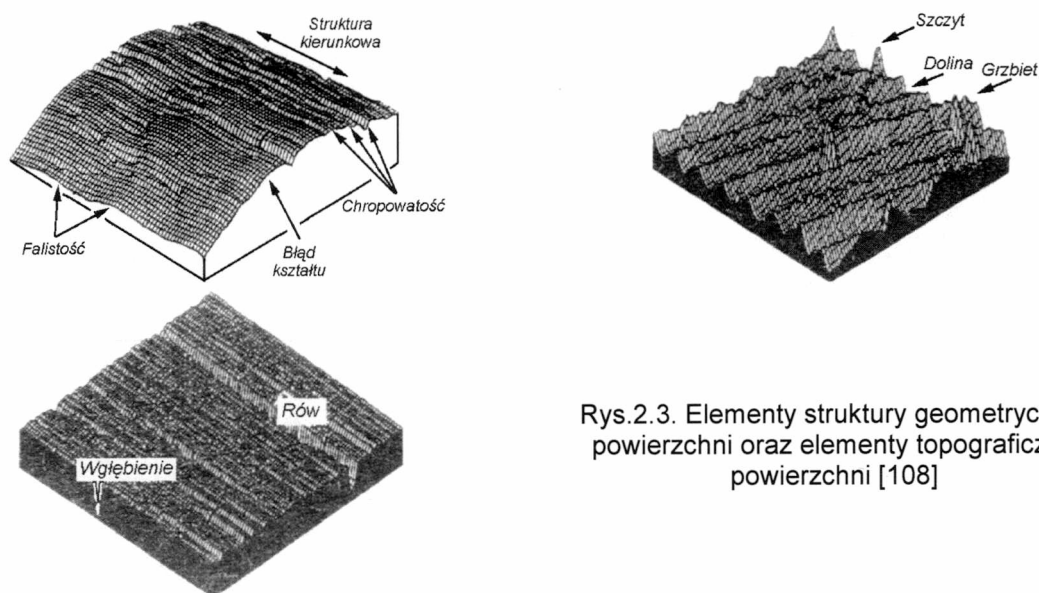
b) falistość powierzchni, gdy $50 \leq \frac{S}{R} < 1000$; (2.2)

c) błąd kształtu, gdy $\frac{S}{R} > 1000$. (2.3)

Elementy struktury geometrycznej powierzchni pokazano na rys.2.2 [74] i rys.2.3 [108].



Rys.2.2. Podstawowe elementy profilu powierzchni rzeczywistej: a) błąd kształtu, b) falistość, c) chropowatość, d) i e) nierówności wyższych rzędów [74]



Rys.2.3. Elementy struktury geometrycznej powierzchni oraz elementy topograficzne powierzchni [108]

Oprócz nierówności powierzchni struktura stereometryczna, w mniejszym lub większym stopniu, skażona jest także przez nieciągłości ukierunkowania lub charakteru struktury geometrycznej, zwane wadami. Wyróżnia się ponad 30 rodzajów wad powierzchni powstałych wskutek:

- oddziaływania innych ciał,
- naprężeń i wad materiału obrabianego,
- korozji,
- erozji, itp.

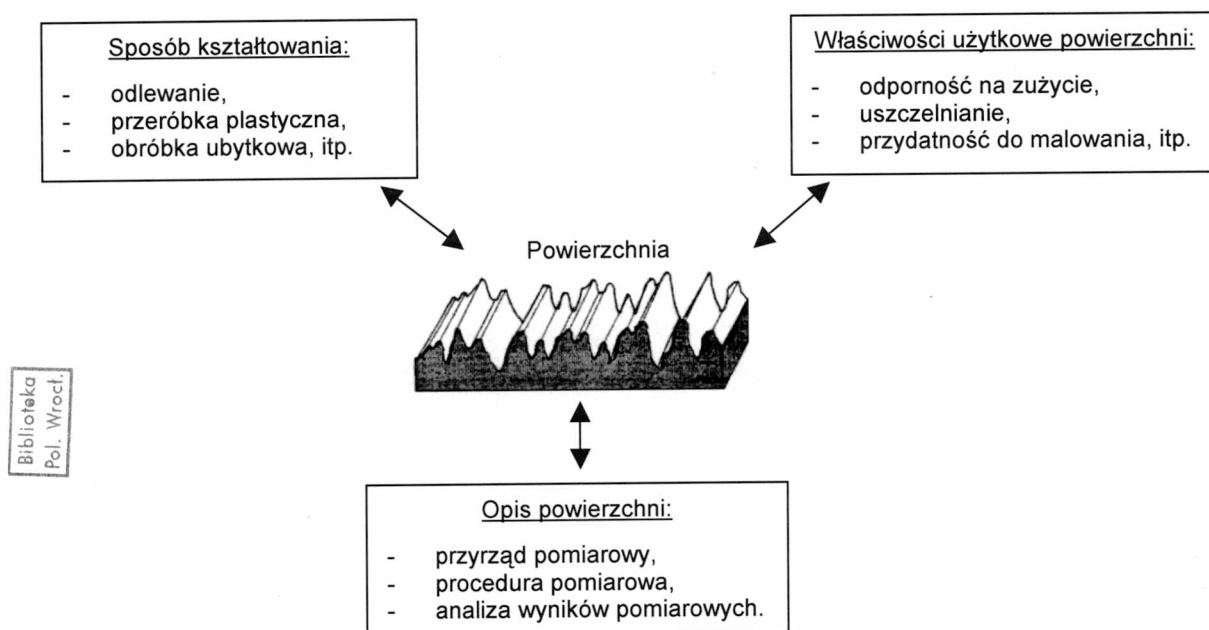
Najczęściej spotykanymi wadami struktury stereometrycznej powierzchni są: skazy, bruzdy, rysy, pęknięcia, pory oraz szczyrby, zadziory, rąbki, zagniecenia, sfałdowania, łuski i inne.

Struktura geometryczna powierzchni wpływa w bardzo istotny sposób na jej właściwości eksploatacyjne, takie jak: odporność na zużycie przez tarcie (siły tarcia i czas docierania), sztywność połączeń stykowych, wytrzymałość zmęczeniową, przewodność cieplną, emisyjność, opory przepływu, szczelność i inne. W trakcie eksploatacji, zarówno grubość, jak i właściwości warstwy wierzchniej mogą ulegać zmianom w wyniku utleniania, tarcia, korozji, zmęczenia, itp.

Podane definicje chropowości i faliistości nie do końca precyzują zakres, jaki obejmuje każda z tych wielkości, co może prowadzić do niejednoznaczności interpretacji, jaki może się zdarzyć na przykład przy wyborze filtra i długości odcinka elementarnego. Doprowadzić to może do uzyskania, dla tego samego zmierzonego profilu, różnych wartości parametrów chropowości czy faliistości. Podobne trudności występują w pomiarach powierzchni, dla których składowa faliistości jest zmienna na obszarze mierzonej

powierzchni. Dochodzi wtedy do sytuacji, w której w pewnych fragmentach należy traktować ją jako chropowatość, w innych zaś jako falistość [91]. Pamiętać należy również, że przez użycie odpowiedniej filtracji i usunięcie błędów kształtu oraz falistości traci się prawdziwy obraz mierzonej powierzchni. Stąd pomijanie niektórych składowych SGP, jak również sposób ich pomiaru, zależą od zadania jakie ma ona spełniać.

Na rysunku 2.4 pokazano 3 grupy czynników związanych z powierzchnią: jej tworzeniem, opisem i funkcjonalnym zastosowaniem. Są one ściśle powiązane ze sobą i wymagają szczegółowej analizy przy ocenie funkcjonalności powierzchni dla każdego z jej zastosowań.



Rys.2.4. Trzy grupy czynników związanych z powierzchnią i wzajemne zależności między nimi wg [20]

W celu stworzenia pełniejszego opisu stanu warstwy wierzchniej należy pamiętać także o czwartej grupie czynników, związanych z fazą projektowania powierzchni, której nie uwzględniono na schemacie pokazanym na rys.2.4. W związku z tym, można wyodrębnić 4 grupy czynników wpływających na stan WW:

- czynniki związane z projektowaniem WW,
- czynniki związane z kształtowaniem WW,
- czynniki związane z eksploatacją WW,
- czynniki związane z badaniem WW.

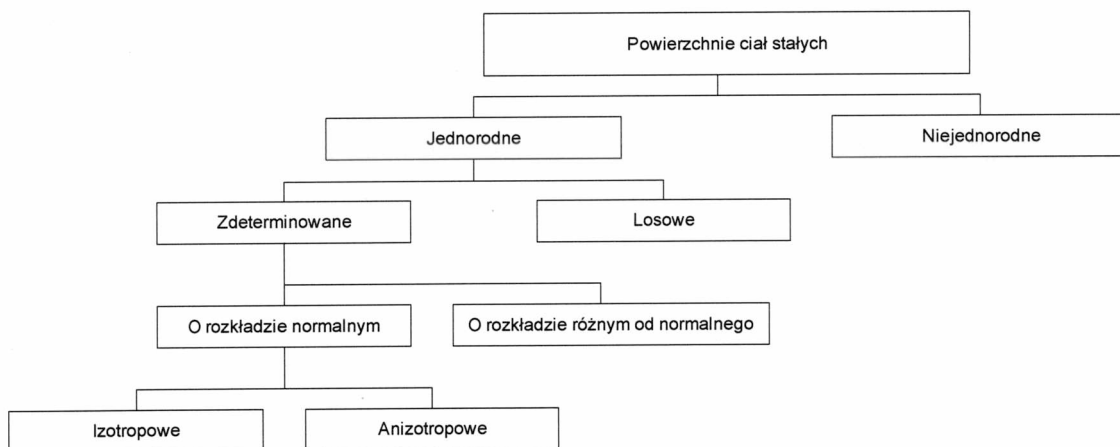
Właściwości warstwy wierzchniej, w tym strukturę geometryczną powierzchni można opisać szeregiem parametrów wzajemnie ze sobą powiązanych. Sposób powiązania jest zazwyczaj złożony i bądź bardzo trudny, bądź niemożliwy do matematycznego określenia.

Na podstawie powyższych rozważań można stwierdzić, że jeżeli warstwa wierzchnia w decydującym stopniu wpływa na cechy funkcjonalne wyrobu, a jednocześnie warstwa ta zależy od warunków technologicznych wytwarzania tego wyrobu, to procesy technologiczne powinny być tak projektowane i realizowane, aby nie tylko zapewniały uzyskanie wymaganej dokładności wymiarowo-kształtowej, lecz jednocześnie powodowały powstawanie warstwy wierzchniej o cechach optymalnych ze względu na własności użytkowe wyrobów [32].

3. STAN ZAGADNIENIA

3.1. KLASYFIKACJA STRUKTUR GEOMETRYCZNYCH POWIERZCHNI

Ułatwieniem w analizie modeli topografii powierzchni jest właściwa ich klasyfikacja. Podział modeli powierzchni ze względu na charakter występujących na nich cech zaproponowali w swych opracowaniach P.R. Nayak, G.Y. Zhou, M.C. Leu i inni [71], [114], [115]. Przykładową klasyfikację modeli pokazano na rys.3.1. Klasyfikacja taka wydaje się być bardzo uproszczoną, bowiem nie uwzględniono w niej wielu przypadków struktur chropowatości występujących w warunkach rzeczywistych. Widoczny jest tu brak podziału powierzchni losowych na kolejne grupy. Istnieją na przykład powierzchnie losowe, o różnych rozkładach statystycznych (np. po obróbce strumieniowo-ścierniej, czy po obróbce elektroerozyjnej). Ponadto, powierzchnie zdeterminowane, np. o rozkładzie normalnym, są powierzchniami „losowymi” czego zaprezentowana klasyfikacja nie uwzględnia.



Rys.3.1. Klasyfikacja powierzchni ze względu na jej ukształtowanie geometryczne [115]

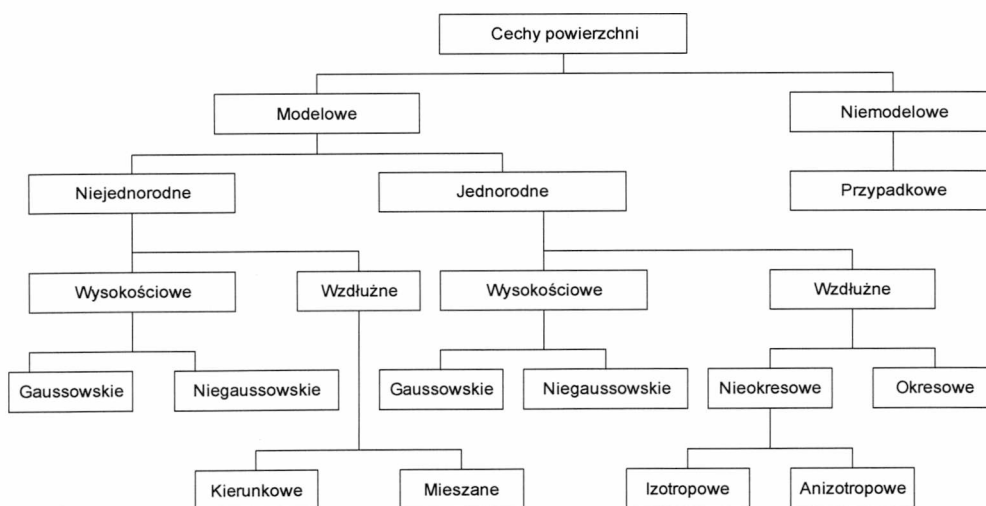
Inne podejście do klasyfikacji powierzchni zaproponowali P.W. Dong, P.J. Sullivan i K.J. Stout w swym opracowaniu [21]. Podział ten, pokazany na rys. 3.2, oparty jest na mechanizmie generowania struktur powierzchni. W ramach pokazanej klasyfikacji autorzy wyróżnili dwie główne grupy cech występujących na powierzchni. Pierwszą z nich są cechy modelowe powierzchni, definiowane jako efekt teoretycznego procesu obróbki. Są one ustalone, a powstająca geometria powierzchni jest wynikiem stereometryczno - kinematycznego odwzorowania narzędzia, przez co charakterystyka tych cech jest możliwa do przewidzenia już z chwilą wyboru rodzaju obróbki. Powierzchnie modelowe dzielone są dalej, odpowiednio do sposobów obróbki, na jednorodne (po toczeniu, szlifowaniu) i niejednorodne, posiadające różne charakterystyki w różnych miejscach (np. po frezowaniu czołowym). Niektóre powierzchnie (po obróbce strumieniowo-ścierniej lub elektrodrażeniu) mają normalny rozkład nierówności, a inne (po gładzeniu) mają

rozkład różny od normalnego i są opisywane przez rozkłady Beta, Gamma, Weibulla, t - Studenta, Chi - kwadrat, itp., albo nie są klasyfikowane w ogóle.

Powierzchnie jednorodne ze względu na właściwości częstotliwościowe można podzielić na periodyczne i aperiodyczne. Periodyczne, np. kształtowane struganiem, toczeniem, wykazują znaczące i określone właściwości w danym kierunku, a aperiodyczne np. po obróbce strumieniowo – ściernej, elektrodrażeniem, elektrochemicznej, nie wykazują żadnych cech okresowości w żadnym kierunku. Niektóre z topografii powierzchni wykazują mieszane właściwości częstotliwościowe i pomimo braku periodyczności można zaobserwować wyraźną kierunkowość struktury powierzchni obrobionej lub ślady obróbki, np. powierzchnie gładzone, szlifowane i po dogładzaniu oscylacyjnym. Izotropia jest kolejną cechą powierzchni aperiodycznych, polegającą na tym, że ich charakterystyka w każdym kierunku jest taka sama. Cecha ta jest właściwością powierzchni, np. po elektrodrażeniu i piaskowaniu [109].

Drugą grupą cech występujących na powierzchni są cechy „niemodelowe”, będące efektem wpływu zakłóceń losowych występujących w rzeczywistym procesie obróbki. Są one, w dużym stopniu, nieprzewidywalne i trudne do zdefiniowania. Cechy te mogą wpływać, w znaczny sposób, na wartości parametrów [21], przy czym mniej istotne jest to ile jest tych cech (ile nieregularnych, wyraźnych dolin lub wierzchołków), a znacznie ważniejsza jest sama ich obecność [109].

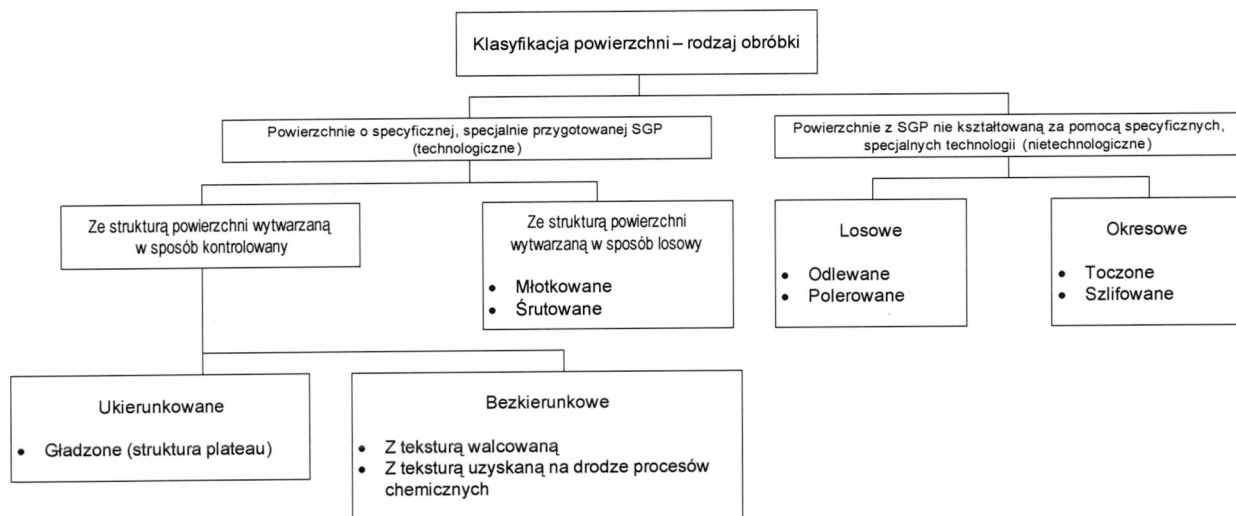
Podstawową wadą tak przedstawionej klasyfikacji jest założenie, że istnieją na powierzchni cechy geometryczne, których nie można modelować. Za pomocą opisanego w dalszej części pracy programu pokazano, że możliwe jest modelowanie wielu przypadkowych cech występujących na powierzchni. Klasyfikacja cech powierzchni przedstawiona na rys.3.2 dotyczy jedynie układu przestrzennego (3D), nie uwzględnia natomiast cech występujących na profilach powierzchni 2D.



Rys.3.2. Klasyfikacja cech powierzchni oparta na mechanizmie ich generowania [21]

W powstających w ostatnich latach pracach [27], [94] zauważyć można nowy trend w klasyfikowaniu powierzchni. Pojawiły się nowe pojęcia, zdefiniowane początkowo przez K.J. Stouta na Kongresie CIRP w Paryżu w 1998 roku i przejęte później, z drobnymi poprawkami, przez C.J. Evansa i J.B. Bryana.

Ogólną klasyfikację powierzchni, zaproponowaną przez K.J. Stouta, przedstawiono na rys.3.3, 3.4. Dzieli ona powierzchnie na dwie grupy:



Rys.3.3. Klasyfikacja powierzchni ze względu na zastosowany rodzaj obróbki [94]



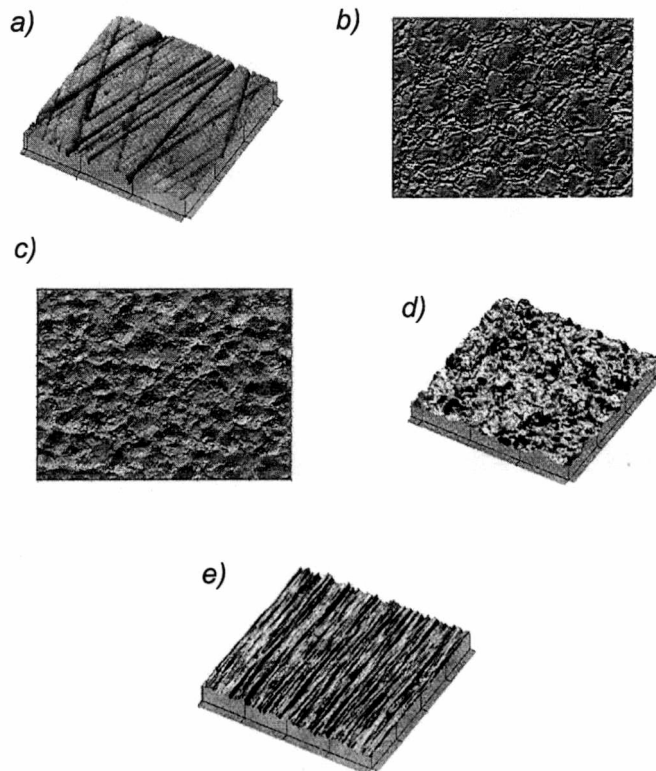
Rys.3.4. Klasyfikacja powierzchni ze względu na otrzymane właściwości warstwy wierzchniej [94]

- Powierzchnie technologiczne – czyli wytwarzane tak, aby w ściśle określony i kontrolowany sposób zmieniać właściwości powierzchni rzeczywistej i strefy

przypowierzchniowej, w celu osiągnięcia na nich pewnych, wymaganych właściwości.

- Powierzchnie nietechnologiczne – czyli takie, które powstają jako bezpośrednia konsekwencja technologii użytej w trakcie jej wykonania. W przypadku takich powierzchni nie ma możliwości oddziaływania na ich właściwości funkcjonalne.

Przykłady topografii powierzchni usystematyzowanych według powyższego schematu pokazano na rys.3.5 [94].



Rys.3.5. Przykłady topografii powierzchni i sposób ich usystematyzowania: a) powierzchnia gładzona - technologiczna, struktura wytwarzana w sposób kontrolowany, ukierunkowana; b) powierzchnia trawiona i walcowana na zimno – technologiczna, struktura wytwarzana w sposób kontrolowany, bezkierunkowa; c) powierzchnia kulkowana kuleczkami szklanymi – technologiczna, ze strukturą powierzchni wytwarzaną w sposób losowy; d) powierzchnia odlewu wykonanego w formie piaskowej – nietechnologiczna, losowa; e) szlifowana – nietechnologiczna, okresowa [94]

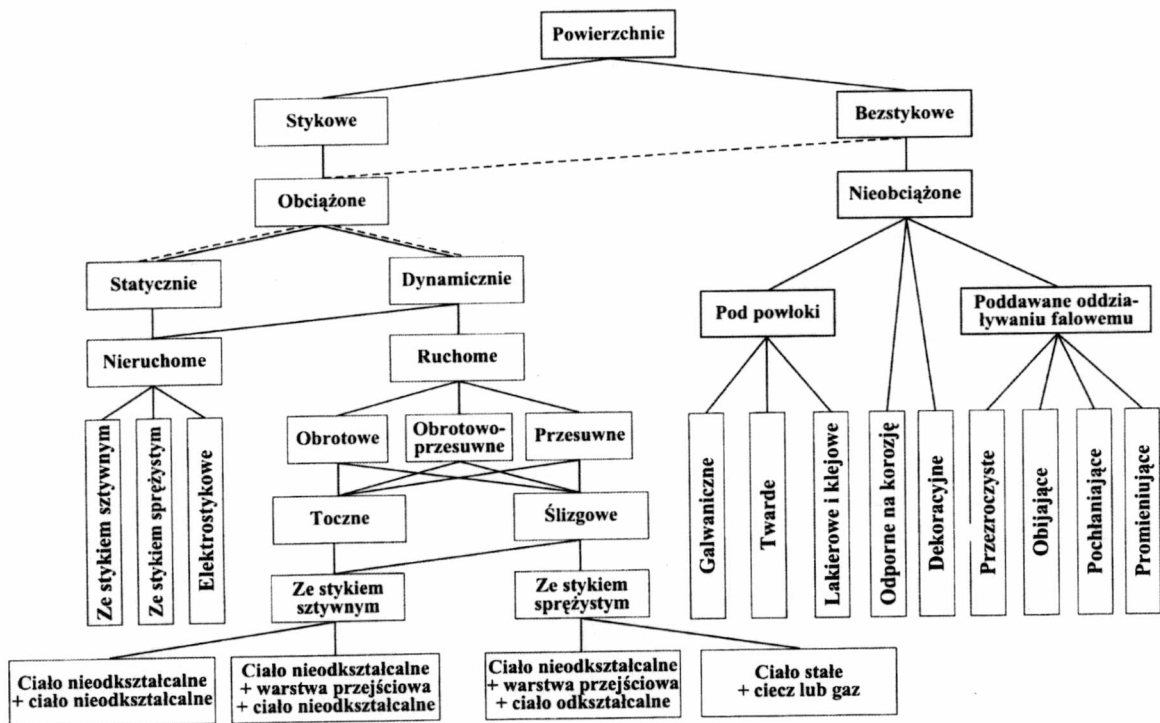
Najbardziej dyskusyjnym punktem tych klasyfikacji wydaje się być niezbyt trafne użycie przez autorów pojęć powierzchni nietechnologicznych. Do powierzchni nietechnologicznych zaliczono bowiem, np. powierzchnie odlewane czy toczone. Dyskusyjne jest także umieszczenie np. szlifowania, a szczególnie polerowania, w grupie tych struktur, które nie są wykonane jako specyficzne, przygotowane specjalnie do konkretnego zastosowania. Rzuca się w oczy również próba ujednolicenia dwóch podziałów: ze względu na rodzaj obróbki (rys. 3.3) i ze względu na otrzymane własności

warstwy wierzchniej (rys.3.4), co może powodować u odbiorcy pewne niejasności interpretacyjne.

Obszerne omówienie klasyfikacji struktur powierzchni, wraz z nowym, oryginalnym podejściem do tego problemu, można znaleźć także w książce K.E. Oczosia i V. Lubimova [75]. Autorzy zaproponowali podział powierzchni konstrukcyjnych na (rys.3.6):

- stykowe (powierzchnie dwóch elementów będących ze sobą w mechanicznym styku),
- bezstykowe (gdzie taki styk nie występuje),
- obciążone (znajdujące się pod obciążeniem mechanicznym wywołującym naprężenia),
- nieobciążone (mechanicznie),
- ruchome
- nieruchome (powierzchnie stykowe z ich przemieszczeniem względnym lub bez niego).

Przedstawiony podział powierzchni dotyczy jednak przeznaczenia, współpracy i rodzaju obciążenia, jakim będą one poddane. Nie odnosi się on bezpośrednio do cech geometrycznych powierzchni.



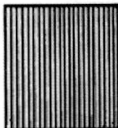
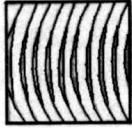
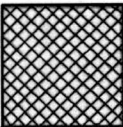
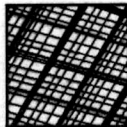
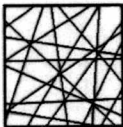
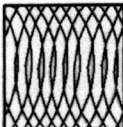
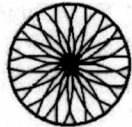
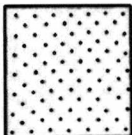
Rys.3.6. Uogólniona klasyfikacja powierzchni konstrukcyjnych [75]

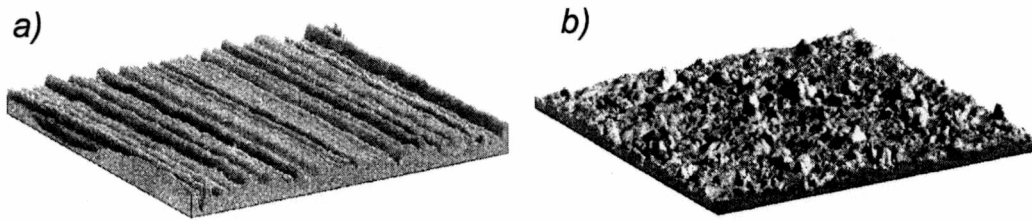
Za podstawę klasyfikacji kształtów geometrycznych powierzchni można przyjąć następujące cechy charakterystyczne SGP [75]:

- kierunkowość,
- okresowość,
- determinowość składowej okresowej,
- izotropowość.

Kierunkowość SGP określa położenie śladów powstałych na powierzchni po procesie obróbki (tab. 3.1). Klasyfikacja kierunkowości została przeprowadzona na podstawie normy PN-87/M-04256 [84] i jest cytowana w publikacjach wielu autorów [74], [75], [117]. Wszystkie powierzchnie dzielą się na ukierunkowane i nieukierunkowane (rys.3.7).

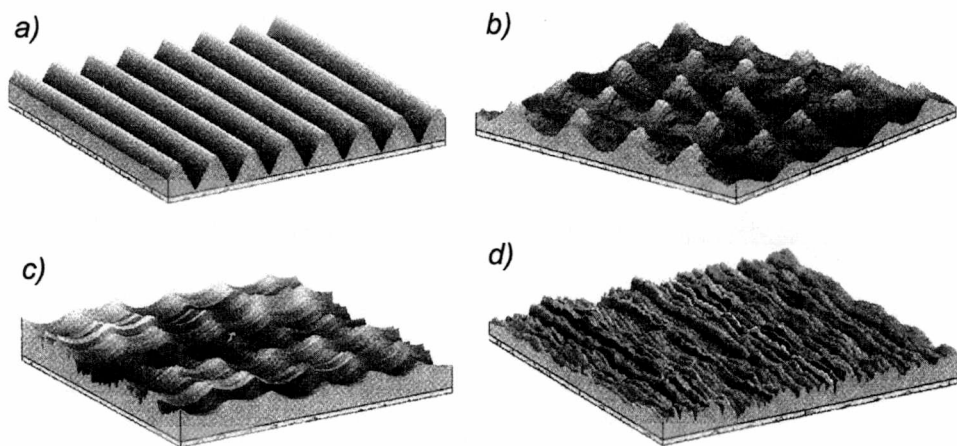
Tabela 3.1. Kierunkowość struktury geometrycznej powierzchni [74], [75], [84], [117]

Rodzaj	Odmiana Kierunkowości	Sposób obróbki	Ślady po obróbce
Jedno-kierunkowa	Równoległa	Struganie Dłutowanie Przeciąganie	
	Prostopadła	Toczenie wzdłużne Wytaczanie Rozwiercanie Struganie Dłutowanie Przeciąganie	 
	Współśrodkowa	Toczenie czołowe Pogłębianie Frezowanie czołowe	 
Wielo-kierunkowa	Skrzyżowana	Frezowanie czołowe Gładzenie	 
	Nieuporządkowana	Skrobanie Docieranie	 
	Promieniowa	Szlifowanie czołowe	 
Bez-kierunkowa	Punktowa	Obr. elektrochemiczna Stumieniowościenna Ultradźwiękowa	



Rys.3.7. Struktura geometryczna powierzchni : a) ukierunkowana, b) nieukierunkowana [75]

Powierzchnie ukierunkowane dzielą się z kolei na powierzchnie okresowe i powierzchnie losowe. Obie te cechy mogą występować, z różnym nasileniem, na jednym bądź wielu rozpatrywanych kierunkach [75] (rys.3.8).



Rys.3.8. Powierzchnie ukierunkowane: a) okresowa jednokierunkowa, b) okresowa dwukierunkowa, c) okresowa w jednym kierunku i losowa w drugim, d) losowa [75]

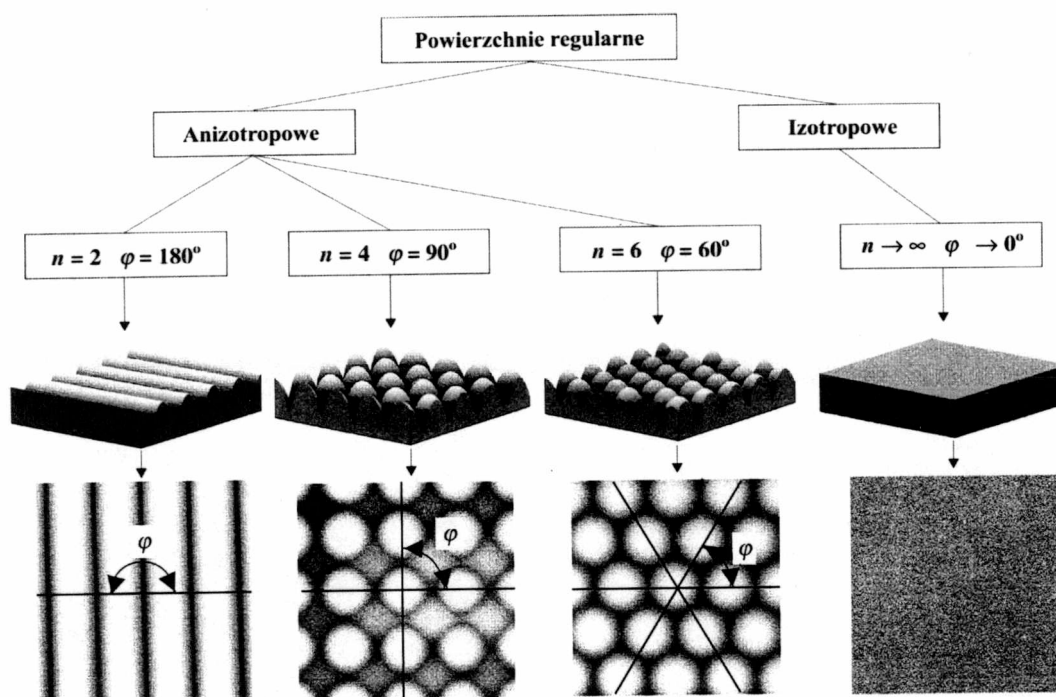
Okresowość występuje na powierzchni w postaci zdeterminowanej bądź niezdeterminowanej. Okresowość zdeterminowana to taka, której profil można określić w sposób analityczny lub doświadczalny, a powstaje np. w wyniku toczenia, strugania. Okresowość niezdeterminowana to taka, która powstaje w sposób losowy, np. po kształtowaniu narzędziem o niezdefiniowanej geometrii lub wskutek drgań samowzbudnych. Powierzchnie okresowo symetryczne pokazano na rys. 3.9 [75].

Determinowość składowej okresowej powierzchni, powstaje podczas obróbki narzędziem o określonej geometrii ostrza i sprzężonej kinematyce ruchów narzędzia i przedmiotu obrabianego. Cechę tę charakteryzuje w układzie 3D parametr sKd [62], [77].

$$sKd = \frac{D}{Sq^2} \quad (3.1)$$

gdzie: D – dyspersja rozkładu rzędnych podstawowego teoretycznego profilu składowej chropowatości zdeterminowanej, Sq – dyspersja rozkładu rzędnych profilu rzeczywistej chropowatości powierzchni analizowanej.

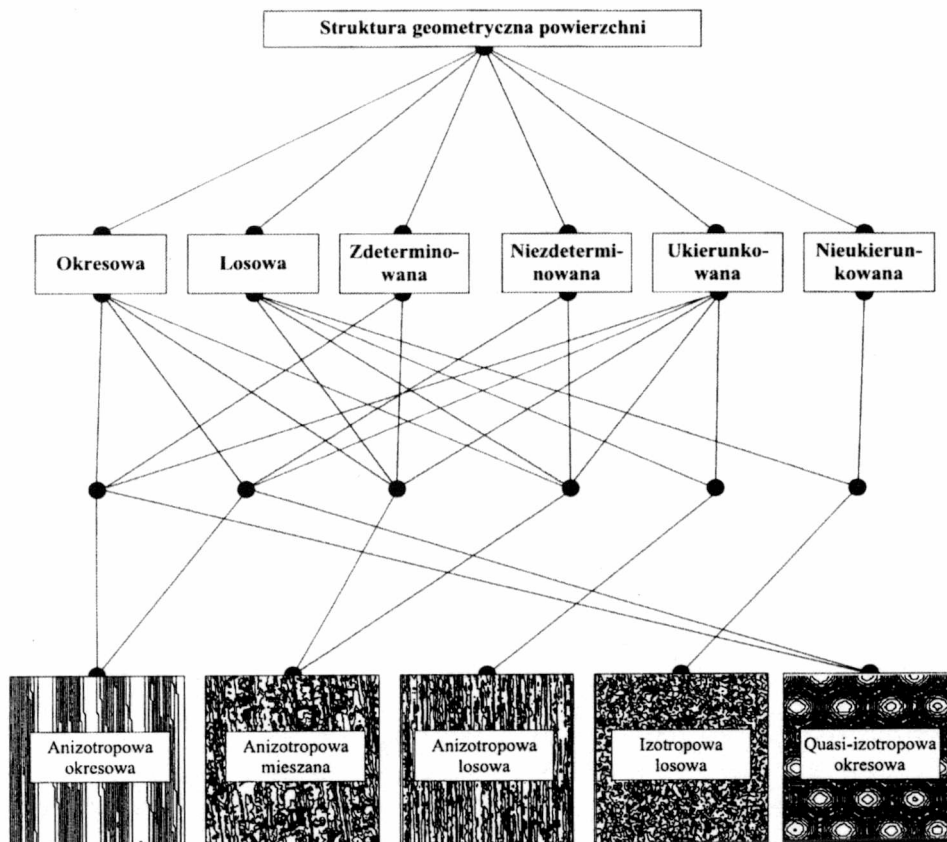
Parametr sKd przyjmuje wartości w przedziale od 0 do 1, przy czym wartość zero odpowiada powierzchni całkowicie losowej, natomiast wartość jeden powierzchni całkowicie zdeterminowanej.



Rys.3.9. Okresowe powierzchnie symetryczne [75]

Izotropowość SGP określa, czy badana powierzchnia wykazuje takie same własności fizyczne i geometryczne we wszystkich badanych kierunkach. Istnieją dwie metody obliczania współczynnika anizotropowości SGP [32], [77]. Pierwsza, oparta jest na przekroju 3D – funkcji autokorelacji, druga, na porównaniu parametrów chropowatości Ra mierzonego w różnych kierunkach. W praktyce przyjęto, że powierzchnie anizotropowe znajdują się w przedziale $0\% < I_z < 20\%$, powierzchnie mieszane $20\% < I_z < 80\%$, natomiast powierzchnie izotropowe $80\% < I_z < 100\%$.

Powierzchnie rzeczywiste mają różne powiązania omówionych cech geometrycznych. Rysunek 3.10. [75] przedstawia schemat możliwych ukształtowań SGP.



Rys.3.10. Schemat podziału SGP [75]

Przedstawione na rys. 3.6÷3.10 oraz w tabeli 3.1 schematy podziałów powierzchni stanowią opis różnorodnych cech geometrycznych występujących na powierzchniach (określanych po pomiarze stereometrycznym 3D). Jednak wyraźnym brakiem przedstawionych klasyfikacji jest nieuwzględnienie w nich cech występujących na profilach 2D. Umożliwiłoby to wzbogacenie klasyfikacji i rozszerzenie zaprezentowanych struktur np. struktura okresowa jednokierunkowa, rys.3.8.a, może mieć charakter ostrowierzchołkowy lub płaskowierzchołkowy. Wydaje się również dość skomplikowane, dla niewprawnego użytkownika, zaklasyfikowanie struktur do odpowiedniej grupy np. rys.3.8 b i c.

3.2. MODELOWANIE CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI

Modelowanie profili chropowatości 2D i powierzchni 3D staje się dziedziną inżynierii powierzchni rokującą duże nadzieje rozwoju. W chwili obecnej, pomimo już prawie 100 - letniej historii, modelowanie znajduje się wciąż w fazie badań, a różnorodność i złożoność powierzchni rzeczywistych jest poważnym utrudnieniem w ich szerokim zastosowaniu w praktyce. Już przed kilkudziesięcioma laty były notowane wypowiedzi

o konieczności rozwoju badań nad modelowaniem powierzchni. Procedura modelowania, dzięki swojej prostocie i zdolności odzwierciedlania zjawisk zachodzących na powierzchni przedmiotu, staje się potężnym narzędziem do przewidywania skutków działań zamierzonych i zakłóceń losowych [92]. Zastosowanie symulacji komputerowej i współczesnych możliwości technik obliczeniowych umożliwia stosowanie modeli coraz bardziej zbliżonych do rzeczywistej geometrii powierzchni [45].

W latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych XX wieku pojawiają się prace, w których autorzy (P.-H. Brammertz, M. Elsharkawy, M. Hasegawa, G.M. Zhang i inni) modelowali profile chropowatości w oparciu o ruch narzędzia [7], [26], [37], [113]. Zaproponowali oni znane i stosowane do dziś podstawowe wzory opisujące teoretyczny profil chropowatości w przypadku odwzorowania łukowego.

$$R_{zt} = \frac{f^2}{8r_\varepsilon} - \frac{f^4}{128r_\varepsilon^3} + \frac{f^8}{1024r_\varepsilon^7} - \dots \quad (3.2)$$

gdzie: r_ε – promień zaokrąglenia naroża ostrza skrawającego, f – posuw.

W przybliżeniu wzór ten można zapisać jako

$$R_{zt} = \frac{f^2}{8r_\varepsilon} \quad (3.3)$$

czy też biorąc pod uwagę poprawkę P.-H. Brammertza, uwzględniającą wpływ sprężystego powrotu materiału

$$R_{zt} = \frac{f^2}{8r_\varepsilon} + \frac{h_{\min}}{2} \left(1 + \frac{r_\varepsilon h_{\min}}{f^2} \right) \quad (3.4)$$

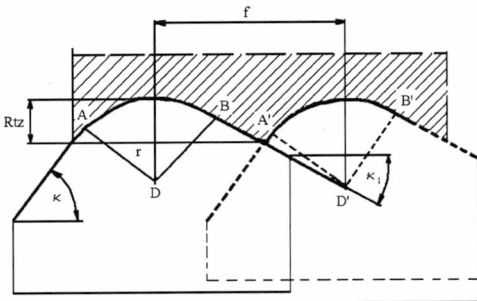
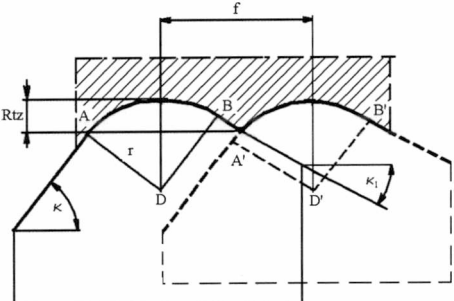
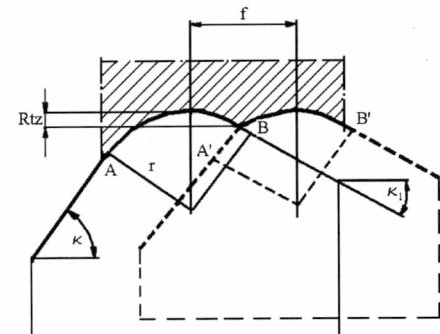
gdzie: $h_{\min}$ – grubość nieusuwanej warstwy materiału

J. Kaczmarek [44] opracował model, także opierający się na założeniu, że chropowatość powierzchni powstaje wyłącznie w wyniku odwzorowania geometryczno – kinematycznego geometrii ostrza na przedmiocie obrabianym. Wyróżnił trzy przypadki odwzorowań: liniowo – liniowe, liniowo – łukowe i łukowo – łukowe (rys.3.11).

Pierwszy przypadek (rys.3.11a) zachodzi, gdy poprzeczne ślady odwzorowania powstają w wyniku przecinania się prostoliniowych części krawędzi ostrza i nazywa się odwzorowaniem liniowym.

Drugi przypadek odwzorowania (rys.3.11b) zachodzi, gdy poprzeczne ślady odwzorowania powstają w wyniku przecinania się części łukowej z częścią prostoliniową krawędzi ostrza i nosi nazwę odwzorowania łukowo-liniowego.

Trzeci przypadek odwzorowania występuje wówczas, gdy poprzeczne ślady odwzorowania powstają w wyniku przecinania się łukowych części ostrza (rys.3.11c) i nazywa się odwzorowaniem łukowym.

Przypadek	$r = \text{const}, \kappa = 45^0, \kappa_1 = 30^0, f - \text{zmienna}$
 Odwzorowanie liniowo – liniowe	a) 
 Odwzorowanie liniowo – łukowe	b) 
 Odwzorowanie łukowo – łukowe	c) 

Rys.3.11. Przypadki geometryczno-kinematycznego odwzorowania ostrza na materiale obrabianym [44]

Prace te były rozwijane w ostatnich latach przez K. Kelly'ego, P. Young'a, G. Byrne'a, K.F Ehmana, J. Lipskiego, E Miko i innych [25], [47], [60], [65], [66], [67]. Modele tworzone w latach wcześniejszych zostały zweryfikowane eksperymentalnie. Przeprowadzono również analizę wpływu nierówności powierzchni i dynamiki procesu skrawania na topografię struktury geometrycznej powierzchni. Podane zostały źródła rozbieżności między modelem geometrycznym bez zakłóceń a powierzchnią rzeczywistą.

Zakłócenia te można podzielić na 6 podstawowych grup:

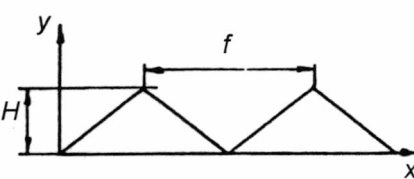
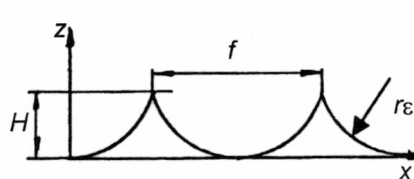
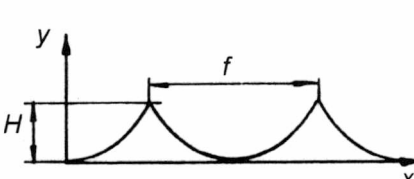
- czynniki geometryczno - kinematyczne jako źródło zniekształceń profilu (szczyrbałość krawędzi skrawającej, ślady zużycia na powierzchni przyłożenia, rozrzut położenia narzędzi wieloostrzowych itp.),
- czynniki związane z plastycznymi i sprężystymi odkształceniami materiału (wyływki, narost, powrót sprężysty WW),
- zjawiska dynamiczne związane z niedostateczną sztywnością i nierównomiernością rozłożenia naddatku (odkształcenia, drgania),
- rysowanie powierzchni obrobionej spływającym wiórem,
- niejednorodność struktury materiału obrabianego itp.,

Udział tych czynników opisał ogólnym wzorem matematycznym W. Grzesik w swej książce [35]:

$$R_z = R_{zt} + \Delta R_{zp} + \Delta R_{zs} + \Delta R_{z\alpha} + \Delta R_{zd} \quad (3.5)$$

gdzie: R_{zt} – teoretyczna wielkość nierówności, ΔR_{zp} - przyrost wysokości nierówności w skutek odkształceń plastycznych, ΔR_{zs} - przyrost wysokości nierówności w skutek odkształceń sprężystych, $\Delta R_{z\alpha}$ - przyrost wysokości nierówności w skutek tarcia powierzchni przyłożenia ostrza o nierówności powierzchni, ΔR_{zd} - przyrost wysokości nierówności w skutek oddziaływań dynamicznych.

Interesującym podejściem wydaje się być także analiza determinowości chropowatości powierzchni. W pracy [62] zaprezentowano trzy podstawowe teoretyczne profile chropowatości, które powstają po obróbkach wykańczających:

Profil	Typ profilu	Wysokość profilu
	Trójkątny	$H = \frac{f \sin \kappa_r \cdot \sin \kappa'_r}{\sin(\kappa_r + \kappa'_r)}$ gdzie: κ_r-kąt przystawienia, κ'_r-pomocniczy kąt przystawienia
	Promieniowy	$H = r_\epsilon - 0,5\sqrt{4r_\epsilon^2 - f^2} \approx \frac{f^2}{8r_\epsilon}$ gdzie: r_ϵ-promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej, f-posuw
	Paraboliczny	$H = 0,5\sqrt{4R^2 - f^2 \tan^2 \lambda} - R$ gdzie: $2R$-średnica przedmiotu po obróbce, f-posuw

Profil trójkątny występuje w przypadkach stosowania precyzyjnej obróbki, głównie nożami z ostrzami diamentowymi, w celu uzyskania powierzchni lustrzanej, natomiast profil paraboliczny jest charakterystyczny dla toczenia skośnymi nożami bezwierzchołkowymi (używany np. w przemyśle aparatury optycznej) [62]. Profil promieniowy to najczęściej spotykany profil w przypadku obróbki kształtującej i wykańczającej. Czwarty występujący model - trójkątny zaokrąglony - występuje zazwyczaj podczas obróbki wstępnej, kiedy w skrawaniu oprócz zaokrąglonego naroża biorą udział prostoliniowe odcinki głównej i pomocniczej krawędzi skrawającej. Powierzchnie powstające w wyniku takiej obróbki należy uznać za przejściowe pomiędzy obróbką wstępną i wykańczającą.

Kinematyczno-geometryczny model matematyczny odwzorowania kształtu ostrza skrawającego na powierzchni w toczniu i szlifowaniu podał także M. Kuzinovski i in. [57].

Zaprezentowanie w pracy [66] badania wykazały korelację między dyspersją przesunięć ostrza skrawającego względem przedmiotu obrabianego i wysokością mikronierówności. Efektem tej obserwacji jest powstanie modeli uzależniających wartości niektórych parametrów chropowatości powierzchni, między innymi, od dynamiki skrawania i geometrii ostrza skrawającego.

W pracach [65], [66] zaprezentowano syntetyczne podejście do procesu konstytuowania mikronierówności powierzchni ujmujące: wariancję względnych przemieszczeń w układzie narzędzie-przedmiot obrabiany w kierunku prostopadłym do głównego ruchu skrawania, geometrię i zużycie ostrza skrawającego, grubość nieusuwalnej warstwy skrawanej oraz współczynnik tarcia między ostrzem i materiałem obrabianym.

Z powyższych rozważań widać, jak skomplikowane oddziaływania towarzyszą konstytuowaniu się mikronierówności powierzchni. Zależności matematyczne podane we wzorach (3.2), (3.3), (3.4) można stosować jedynie jako orientacyjne, przybliżone wytyczne do doboru geometrii ostrza skrawającego i parametrów obróbki.

W przypadku frezowania walcowego i czołowego pierwsze modele powierzchni tworzył M.E. Martellotti w latach czterdziestych XX wieku [64].

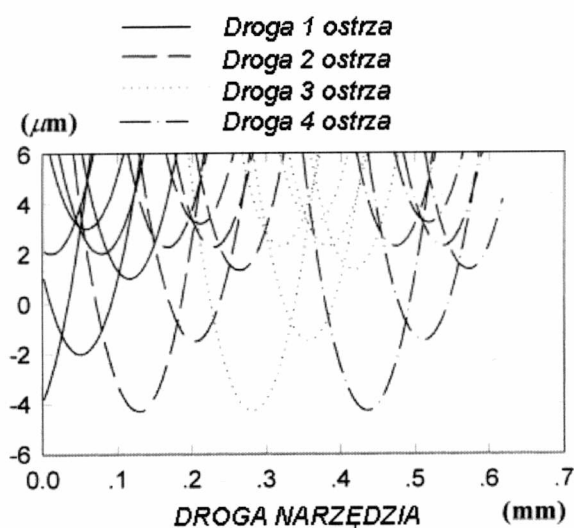
Badania modelu frezowania, wraz z określeniem czynników wpływających na dokładność obróbki, podał w latach sześćdziesiątych T. Sate [91]. Zaproponował on wzór (3.6) na obliczanie parametru R_a z uwzględnieniem posuwu, średnicy freza i wariancji przemieszczeń narzędzia względem przedmiotu obrabianego.

Analizę falistości i błędów kształtu powierzchni frezowanych dla warunków „nieidealnych” przedstawili także J.W. Sutherland i R.E. De Vor. [95]. Model ten rozwinęli dla zmiennych posuwów i geometrii narzędzia F.M. Kolaritis i W. DeVries [48]. Parametr chropowatości R_a według tego modelu można określić z zależności:

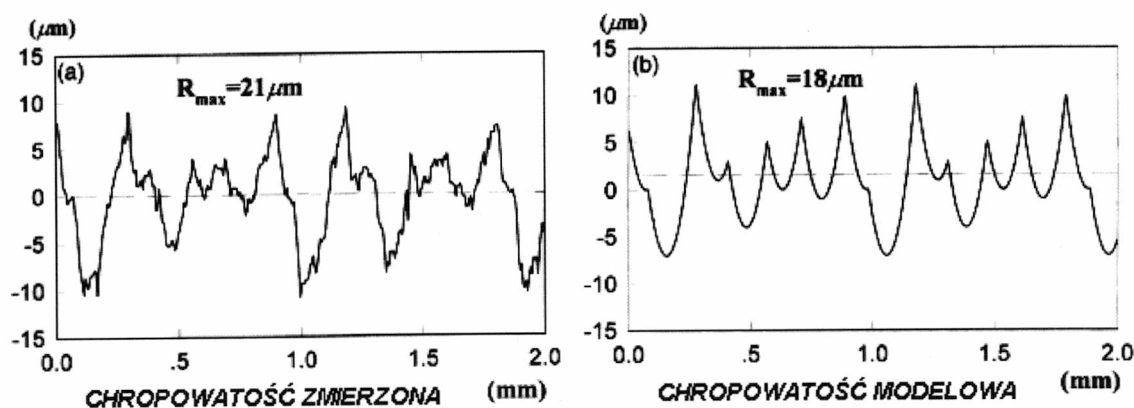
$$Ra = \frac{5}{9} \sqrt{2} \left[\frac{f_z}{150 d^2} + D^2(\xi) + D^2(\rho) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

gdzie: f_z -posuw na ostrze freza, d -średnica freza, $D^2(\xi)$ -wariancja przemieszczeń względnych narzędzie-przedmiot obrabiany, $D^2(\rho)$ -wariancja promieniowego bicia ostrzy.

Modele powierzchni generowanej przez głowicę frezarską i frezem palcowym przedstawili E. Miko [68], [69], M. Alauddin i in. [2]. W najnowszych pracach przeważa trend porównywania wyników modelowania otrzymanych z użyciem nowoczesnych systemów komputerowych i otrzymanych w wyniku rzeczywistej obróbki. Prace takie przedstawili D.K. Baek i in. [3], P. Franco i in. [29], oraz H. Paris i in. [79].



Rys.3.12. Modelowane drogi ostrzy skrawających we frezowaniu czołowym [3]



Rys.3.13. Porównanie wyników pomiaru chropowatości dla powierzchni rzeczywistej (a) i powierzchni modelowej (b) [3]

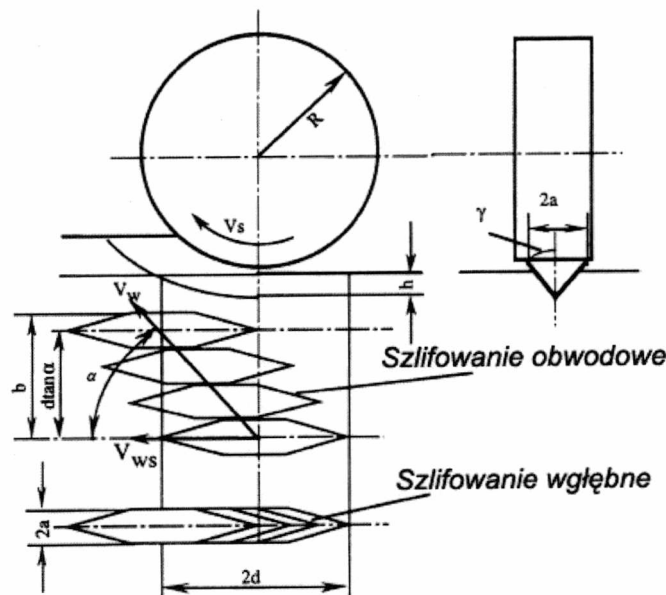
Konstytuowanie mikronierówności powierzchni w wyniku szlifowania ma inny charakter niż w przypadku toczenia czy frezowania. W przeciwieństwie do wyżej opisanych obróbek, gdzie skrawanie odbywa się ostrzem o ściśle zdefiniowanej geometrii - szlifowanie polega na usuwaniu materiału ostrzami ziaren z twardego materiału ściernicy, o nieoznaczonej ściśle liczbie i nieokreślonym geometrycznie kształcie [78].

Rozpatrując mechanizm konstytuowania mikronierówności powierzchni zakłada się, że profil powierzchni przedmiotu powstał z wielu nałożenia czynnych profili ściernicy.

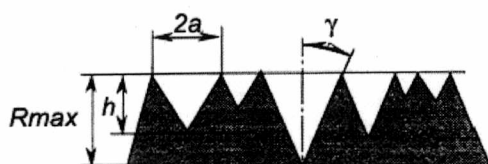
Na stan mikronierówności powierzchni powstałej w wyniku szlifowania mają wpływ następujące czynniki [72]:

- parametry obróbki (v_c , f , a_p , n_p),
- rodzaj i wielkość ziarna,
- rodzaj spoiwa ściernicy,
- twardość, struktura i porowatość ściernicy,
- rodzaj i wydatek cieczy obróbkowych,
- zużycie ściernicy,
- rodzaj obrabianego materiału.

Mechanizm powstawania chropowatości po szlifowaniu obwodowym objaśnili B. Zhang i T. Uematsu (rys.3.14, 3.15, 3.16) [112].



Rys.3.14. Generowanie powierzchni podczas szlifowania obwodowego i węgłębne [112]



Rys.3.15. Schemat profilu powierzchni szlifowanej [112]

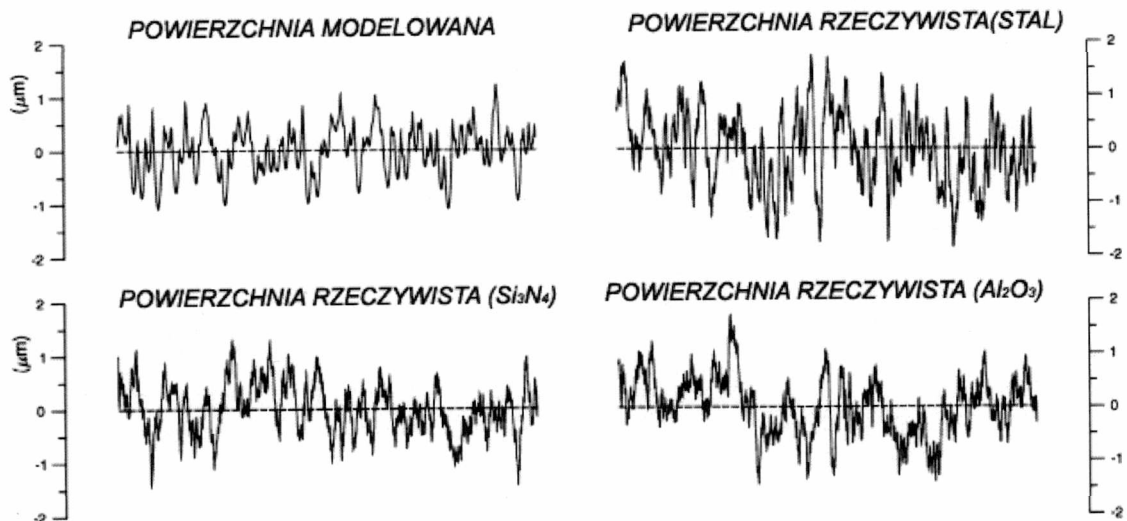


Rys.3.16. Schemat generowania SGP jako wynik oddziaływania ziarna ściernego na powierzchnię szlifowaną obwodowo [112]

Zgodnie z oznaczeniami podanymi na rys.3.14, 3.15, .3.16 chropowatość R_{max} będzie opisana wzorem:

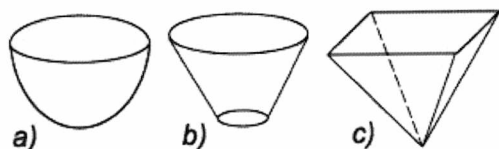
$$R_{max} = \left[\frac{5}{8\sqrt{2\pi R \eta \tan \gamma}} \frac{V_{ws}}{V_s} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

Modelowanie szlifowania ściernicą diamentową opisali w swojej pracy P. Koshy i inni [50]. Przedstawione przez nich efekty symulacji komputerowej w porównaniu z powierzchniami rzeczywistymi pokazano na rys. 3.17.

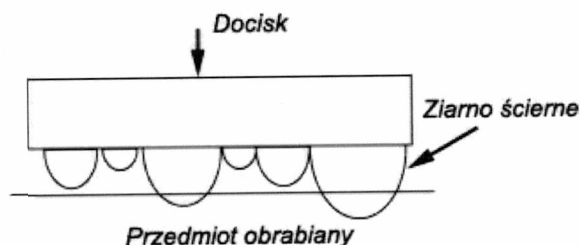


Rys.3.17. Porównanie powierzchni modelowanej z powierzchniami rzeczywistymi różnych materiałów szlifowanych ściernicą diamentową [50]

Działanie polerujące najdrobniejszych ziaren ściernych opisali X. Fengfeng oraz D. Zhou [28]. Zaproponowali oni modelowe kształty podstawowych ziaren ściernych (rys.3.18) oraz model oddziaływania ziaren na powierzchnię (rys.3.19) [28].



Rys.3.18. Najczęstsze kształty ziaren ściernych:
a) kula, b) stożek ścięty, c) ostrosłup [28]



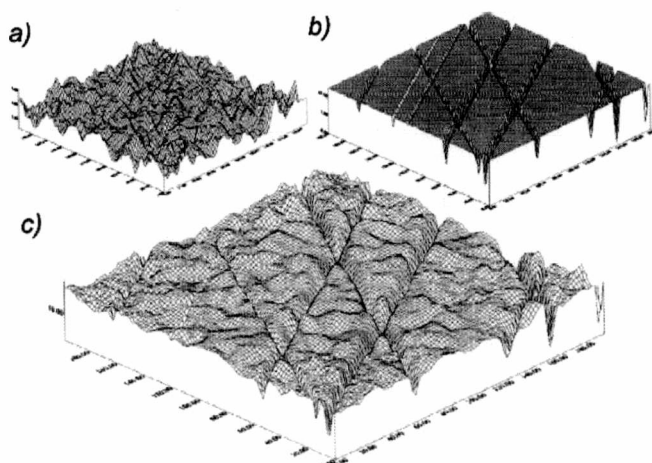
Rys.3.19. Model styku ziaren polerujących z materiałem obrabianym [28]

Zaproponowana przez nich metoda modelowania oparta jest na uwzględnieniu losowego położenia ziaren ściernych, różnej wielkości ziarn w strefie styku oraz uwzględnieniu rozkładu sił na krawędzi skrawającej ziarna. Topografia narzędzia zamodelowana została z uwzględnieniem matematycznego opisu wielkości ziarna (zastosowanie rozkładu Gaussa, odchylenia standardowego i wartości średniej do ustalenia wielkości ziarna). Opis topografii narzędzia ściernego z przypadkowo rozmieszczonymi ziarnami ściernymi opisali także X. Zhou i F. Xi [116].

Dużym zainteresowaniem cieszy się także modelowanie powierzchni „użytkowych”, do których zaliczyć można powierzchnie gładzone. Na początku lat 90-tych XX wieku swoje prace nad modelowaniem takich właśnie powierzchni przedstawili M.C. Malburg i J. Raja [63]. Opracowali oni model „plateau” topografii powierzchni po gładzeniu i stosowali go do aproksymacji krzywej udziału nośnego. B.-G. Rosen i R. Crafoord [89] przedstawili swoją bazę danych, współpracującą z systemami CAD, do przechowywania i odtwarzania danych o powierzchniach modelowych. Wykazali oni przydatność tego typu narzędzi komputerowych do modelowania powierzchni, podając za przykład powierzchnie tulei cylindrowych. Grupa autorów pod kierownictwem B.-G. Rosen’a opracowała także dialogowy system modelowania powierzchni, uwzględniający zarówno geometrię części, jej wymagania funkcjonalne, jak i zmienne wynikające z procesu skrawania [90].

W Polsce pracami nad modelowaniem powierzchni gładzonych zajmują się, P. Pawlus, J. Michalski [82], [83]. Wykorzystanie powierzchni „fraktalnych” do

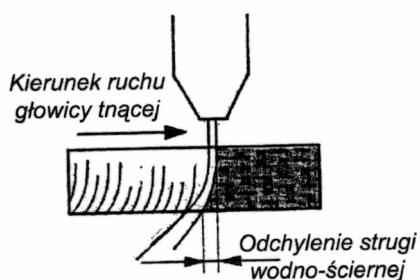
modelowania złożoności struktury „plateau” zaproponował w swej pracy J. Jabłoński (rys.3.20) [39].



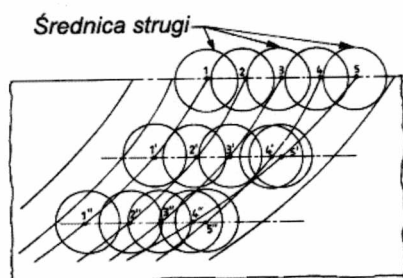
Rys.3.20. Powierzchnia modelowa (c) jako efekt złożenia modelu powierzchni gładzonej (a) i powierzchni „fraktalnej” (b) [39]

Ostatnie lata XX wieku przyniosły gwałtowny rozwój nowoczesnych technik wytwarzania. Jedną z takich metod obróbki jest obróbka wysokociśnieniową strugą wody (AWJM – Abrasive Water Jet Machining). Zastosowanie tej techniki umożliwia kształtowanie pewnych specyficznych i rzadko spotykanych materiałów [61]. Wraz z coraz szerszym zastosowaniem tej metody rozszerza się także krąg autorów opisujących stan warstwy wierzchniej oraz próby modelowania geometrii powierzchni obrabianej strugą wody [51], [101]. Zjawisko kształtowania SGP (w wyniku odchylenia strugi wodno-ściernej) wyjaśniono na rys.3.21 [61] oraz rys.3.22 [101].

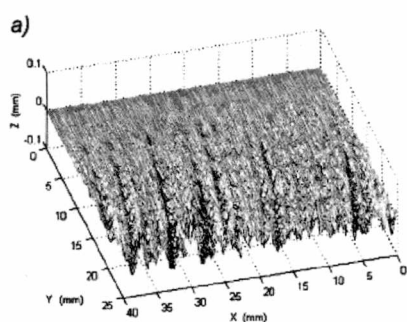
Do modelowania trajektorii strumienia cieczy użyto teorii balistyki, bitterowskiej teorii erozji oraz przypadkowego charakteru oddziaływania cząstek ściernych na obrabianą powierzchnię. Porównanie powierzchni modelowej i rzeczywistej pokazano na rys. 3.23.



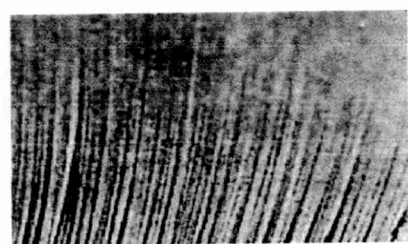
Rys.3.21. Zjawisko odchylenia strugi wodno-ściernej w procesie cięcia [61]



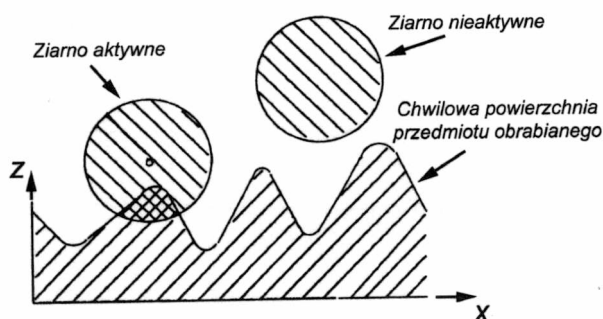
Rys.3.22. Schemat generowania powierzchni rzeczywistej po cięciu strugą [101]



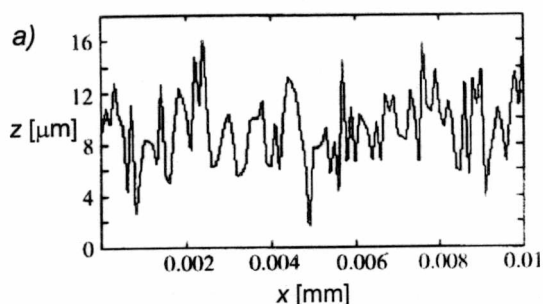
Rys.3.23. Porównanie powierzchni modelowej (a) i powierzchni rzeczywistej (b) po przecinaniu wodno-ściernym [101]



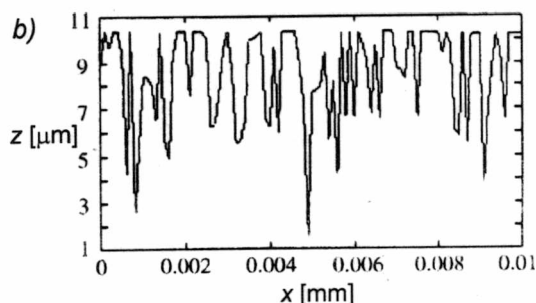
Modelowanie powierzchni, które powstają w wyniku uderzeń o nie ziaren ściernych bądź impulsów elektrycznych, opisane zostały w wielu publikacjach. Model oddziaływania rozpędzonego ziarna ściernego na powierzchnię w obróbce strumieniowo-ścierniej zaproponowali R.K. Jain i V.K. Jain [41]. Pokazali oni schemat ziarna uderzającego w powierzchnię (rys.3.24) oraz efekty symulacji obróbki strumieniowo-ścierniej (rys.3.25).



Rys.3.24. Schemat oddziaływania ziarna ściernego na powierzchnię obrabianą [41]



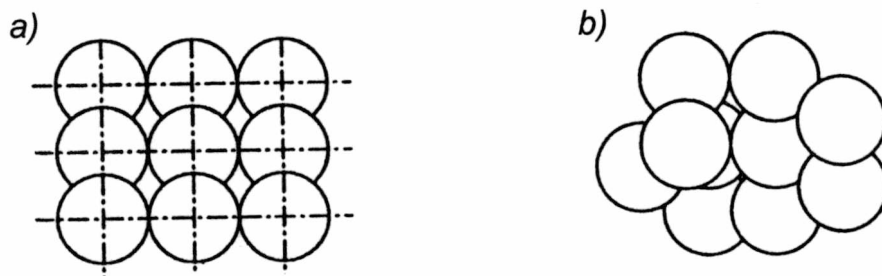
Zmierzona powierzchnia rzeczywista



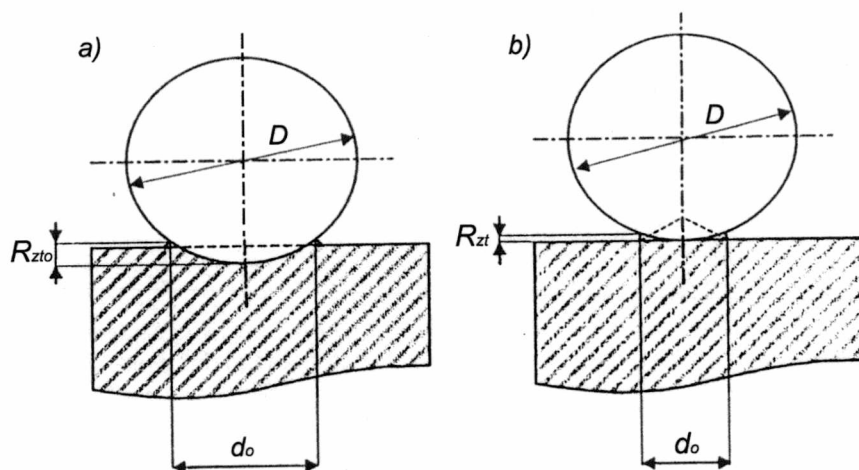
Powierzchnia po obróbce strumieniowo-ściernej (model)

Rys.3.25. Efekt użycia programu symulującego obróbkę strumieniowo-ścierną: a) powierzchnia rzeczywista, b) powierzchnia zamodelowana [41]

Nagniatanie dynamiczne charakteryzuje się tym, iż siły, z jakimi narzędzia (elementy nagniatające) oddziałują na obrabiany przedmiot, są okresowo zmienne w czasie obróbki. Modelowanie powierzchni powstającej w wyniku nagniatania dynamicznego opisał K. Zaleski [110]. Podał on schemat rozmieszczenia śladów (rys.3.26) oraz schemat wgłębiania się pojedynczej kulki w materiał (rys.3.27). Przedstawił zjawiska towarzyszące nagniataniu rozproszonemu oraz skoncentrowanemu. W podanych wzorach na teoretyczną chropowatość w fazie początkowej (3.8), i końcowej obróbki (3.9) uwzględnił wpływ właściwości materiału.



Rys.3.26. Schemat rozmieszczenia śladów powierzchni obrabianej nagniataniem: a) uderzeniowym skoncentrowanym, b) uderzeniowym rozproszonym [110]



Rys.3.27. Schemat zagłębiania się kulki w materiał: a) faza początkowa obróbki, b) faza wyrównywania nierówności powstałych w fazie początkowej [110]

$$R_{zto} = \frac{d_o^2}{4D} \quad (3.8)$$

$$R_{zt} = K_{RH} K_{RK} \frac{d_o^2}{4D} \quad (3.9)$$

gdzie: K_{RH} -współczynnik uwzględniający utwardzenie WW, K_{RK} -współczynnik uwzględniający wyrównanie nierówności powstających w procesie nagniatania dynamicznego rozproszonego.

Modelowanie powierzchni po obróbce elektroerozyjnej zostało opisane przez C. Tricarico [98] oraz J. Valentinčiča i M. Junkara [100]. K.M. Tsai i P.J. Wang zaproponowali użycie sieci neuronowych do modelowania SGP obrabianej erozyjnie [99]. Wpływ rodzaju elektrolitu na stan struktury geometrycznej powierzchni obrabianej elektroerozyjnie, a następnie polerowanej elektrochemicznie, opisali H. Ramasawmy i L. Blunt [88]. Znane są także prace dotyczące modelowania powierzchni po obróbce elektrochemicznej: G.B. Gorjala i in. [31] oraz J. Kozaka i in. [54].

W niektórych analizach i zastosowaniach pojawia się potrzeba nie tylko charakteryzowania powierzchni, ale również generowania powierzchni o właściwościach dobranych do określonych wymagań. Stąd biorą się poszukiwania metod nie tylko do charakteryzowania powierzchni, ale również do generowania i syntezy powierzchni o określonych charakterystykach.

Transformatę Fouriera do celów opisu profili chropowatości wykorzystali M. Takeda i K. Mutoh [96]. Zastosowanie metody szeregów czasowych umożliwiło dokładny opis powierzchni, a zastosowanie odwrotnej transformaty Fouriera generowanie powierzchni

trójwymiarowych. T.Y. Lin i in. [59] oraz W. Juinn-Jong [43] przedstawili kompleksowe podejście do trójwymiarowej charakteryzacji chropowatości i generacji powierzchni na bazie modelowania. W ostatnich 20 latach rozwijają się również badania opisu SGP z wykorzystaniem analizy fraktalnej. Analiza fraktalna do opisu złożoności i nieregularności powierzchni była opisana przez: W. Grzesika i S. Brolla [8], R. Jahn'a i H. Truckenbrodt'a [40], D. Blackmore'a i G. Zhou [6], R.J. Patrikara i in. [81]. Prace z tej dziedziny realizowane są także na Politechnice we Wrocławiu przez M. Wiącka i autora rozprawy [103], [104]. Wykorzystanie sieci neuronowych do modelowania SGP zaproponowali R.J. Patrikara i in. [80].

Specjalny program do analizy kontaktu dwóch powierzchni chropowatych przedstawili W.T. Lai i H.S. Cheng [58], a do modelowania powierzchni M.S. Hong i K.F. Ehmann [38]. Omówili oni symulację powierzchni modelowych (o sinusoidalnej składowej zdeterminowanej) i sposób wprowadzania zakłóceń modelujących rzeczywiste warunki obróbki w przypadku toczenia i frezowania.

Z przedstawionego stanu zagadnienia, dotyczącego klasyfikacji i modelowania struktur geometrycznych powierzchni, wynika że:

- przed rozpoczęciem badań eksperymentalnych konieczne jest opracowanie pełniejszej klasyfikacji topografii powierzchni obejmującej zarówno modele profili chropowatości 2D, jak i powierzchni 3D, a także uwzględniającej cechy modelowe oraz zakłócenia występujące podczas powstawania TWW,
- należy stworzyć komputerowy program do modelowania struktur geometrycznych powierzchni, który uwzględnił będzie możliwość modelowania dowolnie złożonych modeli chropowatości, odzwierciedlający technologiczne i eksploatacyjne warunki kształtowania topografii powierzchni, determinowość, losowość itp,
- brak jest zaleceń dotyczących doboru parametrów chropowatości do opisu zmian cech geometrycznych występujących na badanych powierzchniach oraz nie zostały zbadane i określone związki między parametrami opisującymi TWW, a cechami funkcjonalnymi eksploatacyjnej warstwy wierzchniej (EWW).

4. TEZY, CEL I ZAKRES PRACY

Potrzeba polepszenia jakości wyrobów uzasadnia konieczność wprowadzania nowych, coraz doskonalszych, metod kompleksowej oceny technologicznej warstwy wierzchniej obrobionego przedmiotu.

Powierzchnia rzeczywista charakteryzuje się określonym stanem chropowatości, który może być opisywany za pomocą kilkunastu czy nawet kilkudziesięciu parametrów chropowatości. Nie wszystkie z nich są znormalizowane i podane w polskich normach, czy normach ISO. Doświadczenia przemysłu maszynowego wskazują, że ustalenie zestawu parametrów chropowatości 2D i 3D, które najlepiej opisują zmiany cech geometrycznych zachodzące na powierzchni w wyniku przeprowadzania kolejnych operacji technologicznych, może stanowić problem.

Kluczem do rozwiązania tego problemu wydaje się być zastosowanie matematycznego modelowania geometrii powierzchni, pozwalającego na względnie łatwe otrzymanie niemal dowolnych modeli topografii powierzchni o żądanych, zadanych cechach geometrycznych i parametrach ją charakteryzujących.

Zastosowanie modelowania matematycznego znacznie upraszcza i przyspiesza, a jednocześnie rozszerza, możliwości analityczne np. oceny przydatności zdefiniowanych, istniejących lub nowo opracowanych parametrów chropowatości powierzchni do opisu określonych cech kształtu topografii powierzchni.

Powyższe spostrzeżenia pozwoliły na postawienie następujących tez naukowych pracy; głównej i pomocniczych:

TEZA GŁÓWNA:

Istnieje możliwość szybkiego, matematycznego określenia grupy parametrów chropowatości opisujących wybrane cechy struktury geometrycznej powierzchni.

TEZY POMOCNICZE:

1. *Można matematycznie zamodelować złożoną, niemal dowolnie skomplikowaną, topografię powierzchni, z odzwierciedleniem kinematycznych i dynamicznych aspektów jej kształtowania, tak aby w dostatecznie dokładny sposób przybliżała ona topografię otrzymaną w warunkach rzeczywistych.*

2. *Istnieje możliwość badania cech geometrycznych dowolnych powierzchni, uzyskanych za pomocą modelowania matematycznego, bez konieczności często trudnego, czasochłonnego i kosztownego wytwarzania ich w warunkach rzeczywistych.*

Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej tematyki obejmującej rozprawę przyjęto następujące cele pracy:

- opracowanie klasyfikacji struktur geometrycznych powierzchni,
- rozszerzenie wiedzy na temat zależności między wybranymi cechami geometrycznymi, a parametrami chropowatości opisującymi mikrostrukturę warstwy wierzchniej (WW),
- opracowanie założeń i metodyki modelowania geometrii powierzchni,
- wykonanie programu komputerowego do cyfrowego modelowania złożonych topografii powierzchni o dużej zgodności z powierzchniami rzeczywistymi,
- opracowanie systemowego opisu parametrycznego modelowych struktur chropowatości,
- zbadanie wpływu czynników deterministycznych i losowych na charakter zamodelowanych powierzchni i wartości parametrów chropowatości ją opisujących,
- zbadanie wrażliwości parametrów chropowatości powierzchni (określonych w układzie 2D i 3D) na anizotropię SGP.

Zakres pracy obejmował:

- wybór charakterystycznych cech geometrycznych modeli struktur geometrycznych powierzchni (SGP) 2D i 3D,
- zamodelowanie matematyczne, z użyciem opracowanego programu, wybranych grup modeli SGP,
- weryfikację programu do modelowania SGP,
- stabilizowanie SGP o różnych wartościach cech, dominujących w wybranych grupach modeli,
- wczytanie danych do programu TalySurf Expert (w układzie 2D) lub programu TalyMap (w układzie 3D), służących do obliczania parametrów chropowatości określanych za pomocą profilografometru firmy Taylor-Hobson,
- obliczenie parametrów chropowatości wygenerowanych profili i powierzchni,
- określenie korelacji między analizowaną cechą SGP a parametrami chropowatości tej cechy.

Z uwagi na znaczną liczbę około 14000 kombinacji różnych modeli SGP, do zweryfikowania metodyki i udowodnienia tezy pracy zdecydowano się na wybór tylko niektórych modeli powierzchni.

5. MODELOWANIE POWIERZCHNI

5.1. WPROWADZENIE

Matematyczne modelowanie powierzchni ma istotne znaczenie, w budowie i eksploatacji maszyn, w tych przypadkach, gdy [4], [5], [16]:

- Otrzymanie rzeczywistych powierzchni jest w określonych warunkach niemożliwe, trudne, czasochłonne lub kosztowne, a profile wirtualne mogą być przydatne w badaniach analityczno-doświadczalnych, np. w badaniach procesów trybologicznych, emisyjności lub refleksyjności optycznej i cieplnej, stykowej przewodności cieplnej i elektrycznej, odporności korozyjnej, przyczepności powłok, wrażeń estetycznych, itp.
- Konieczne jest otrzymanie specyficznych zarysów topografii powierzchni o charakterystycznych cechach, np. o:
 - ściśle określonych wartościach parametrów wysokościowych lub horyzontalnych,
 - różnych, określonych wartościach wzajemnych proporcji między cechami pionowymi i horyzontalnymi SGP,
 - różnym udziale czynników zdeterminowanych i losowych,
 - różnej anizotropii śladów obróbki,
 - konkretnych wartościach wybranych parametrów chropowatości i falistości powierzchni, itp.
- Konieczne jest analityczne zbadanie wpływu:
 - warunków kształtowania technologicznego bądź eksploatacyjnego (np. trybologicznego) na zmiany topografii powierzchni,
 - topografii powierzchni na wybrane cechy funkcjonalne powierzchni.
- Istnieje potrzeba zbadania wrażliwości znormalizowanych lub nowotworzonych parametrów chropowatości na specyficzne cechy profilu topografii powierzchni.
- Istnieje potrzeba analitycznego zbadania profilu, który nie jest „skażony” filtrującym działaniem igły pomiarowej oraz błędami samego pomiaru.
- Trzeba ocenić, jak będzie wyglądała i jakie parametry chropowatości będzie miała powierzchnia po odwzorowaniu jej za pomocą igły o określonej geometrii.
- Testowane są programy komputerowe służące do wizualizacji topografii powierzchni i analiz parametrów chropowatości.

Matematyczne modelowanie topografii powierzchni, tak w układzie 2D jak i 3D, może być dokonywane wieloma sposobami. Można tu wyodrębnić dwa zasadnicze sposoby podejścia do tego zagadnienia. Pierwszym z nich jest „czysto matematyczne” modelowanie, nie uwzględniające rzeczywistych warunków technologicznego bądź eksploatacyjnego kształtowania powierzchni i zjawisk związanych z mechaniką kształtowania się WW. Nadrzędną przesłanką jest tutaj otrzymanie dużego podobieństwa do kształtu profilu zaplanowanego wirtualnie, bądź otrzymanego w warunkach rzeczywistych. Modelowanie to jest dość proste do przeprowadzenia i w wielu przypadkach może dawać stosunkowo dobre przybliżenie do powierzchni oczekiwanych, a ponadto możliwe jest generowanie powierzchni o bardzo specyficznych kształtach, bardzo trudnych lub nawet niemożliwych do uzyskania w obecnych warunkach technicznych.

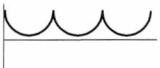
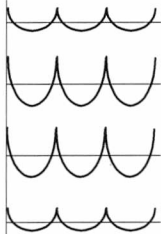
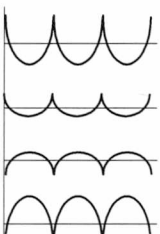
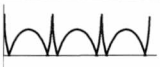
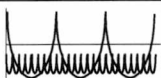
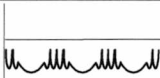
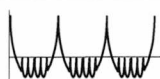
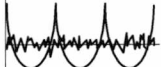
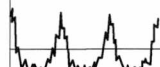
Drugim podejściem jest modelowanie odzwierciedlające rzeczywiste warunki tworzenia powierzchni. Jest ono znacznie trudniejsze do przeprowadzenia niż modelowanie „czysto matematyczne”. Daje jednak znacznie większe możliwości analizowania wpływu warunków kształtowania technologicznego i eksploatacyjnego na topografię warstwy wierzchniej funkcjonalnych powierzchni elementów maszyn. Symulować tu można odwzorowywanie się na powierzchni technologicznej poszczególnych ostrzy o zdefiniowanym, losowym bądź mieszanym charakterze. Można także uwzględniać odwzorowywanie etapów kształtowania się warstwy wierzchniej w kolejno po sobie następujących operacjach, np. można symulować wytaczanie z silnie zaznaczonymi cechami profilu zdefiniowanego kształtem ostrza i następujące po nim szlifowanie (lub gładzenie) kształtujące profil o dużo mniejszej chropowatości i znacznym udziale czynnika losowego. Modelowanie to może uwzględniać nie tylko stereometrię ostrzy, ale także kinematykę ruchów narzędzia względem przedmiotu obrabianego, a także zakłócenia o charakterze harmonicznym bądź losowym, jakie mogą oddziaływać na proces kształtowania powierzchni. Uwzględnić tu można mechanikę oddzielania materiału, a także niejednorodność materiału obrabianego, siły i temperaturę skrawania.

Oba podejścia do modelowania powierzchni mogą się do siebie zbliżać, jeśli np. w modelowaniu „czysto matematycznym” uwzględniać się będzie elementy charakterystyczne dla kształtowania w warunkach rzeczywistych lub gdy w modelowaniu mającym odzwierciedlać realne warunki kształtowania warstwy wierzchniej uczynione zostaną zbytnie uproszczenia.

Niezależnie od sposobu podejścia do modelowania powierzchni korzysta się w nim z szeregu funkcji i operacji matematycznych do kształtowania, modyfikacji i „składania” profili z funkcji wyjściowych $f_i(x)$. Najczęściej stosowane funkcje przedstawiono na przykładach w tabeli 5.1 [5]. Używając wielokrotnie tych prostych operacji i funkcji, wzmacniając lub

osłabiając ich działanie współczynnikami korygującymi C_i , można uzyskiwać bardzo złożone profile, w tym profile o bardzo dużym podobieństwie do profili uzyskanych w warunkach rzeczywistych [5], [57].

Tabela 5.1. Najczęściej stosowane operacje matematyczne do modelowania i modyfikowania profili chropowatości w układzie 2D [5]

Schematyczne przedstawienie skutków operacji matematycznych			Opis działania
Funkcje wyjściowe	Operacja	Profil wynikowy	
	$f(x) \pm C$		przesuwa równolegle o $\pm C$ wartości argumentów funkcji
	$-f(x)$		dokonuje inwersji argumentów funkcji
	$f(x) C$		$C > 1$ zwiększa parametry amplitudowe $0 < C < 1$ zmniejsza parametry amplitudowe $-1 < C < 0$ zmniejsza parametry amplitudowe i dokonuje inwersji $C < -1$ zwiększa parametry amplitudowe i dokonuje inwersji
	$ f(x) $		zmienia ujemne wartości argumentu funkcji na dodatnie
	$\min\{f_1(x), f_2(x)\}$		wybiera najmniejsze wartości argumentów z dwóch funkcji
	$\min\{f(x), C\}$		„odcina od góry” wartość funkcji na poziomie C
	$\max\{f(x), C\}$		„odcina od dołu” wartość funkcji na poziomie C
	$\max\{f_1(x), f_2(x)\}$		wybiera największą wartość argumentu z dwóch funkcji
	$f(x) + \text{los}$		zakłóca szumem przebieg funkcji
	$f(x) + \sin(x)$ $f(x) \sin(x)$		„nakłada” na funkcję wyjściową sygnał harmoniczny

Działania te stosować można tak w układach płaskich, jak i przestrzennych [16], [17]. W układzie 3D podczas modelowania powierzchni należy rozpatrzyć dodatkowo problem anizotropii powierzchni, tj. ewentualnego ukierunkowywania się śladów obróbkowych, jak to

ma miejsce np. podczas toczenia [24], [47], [56], gładzenia otworów [39], [63], [82], [83], [118], szlifowania [102], [112], [116] lub frezowania czołowego [2], [18], [29] itp.

5.2. METODYKA MATEMATYCZNEGO MODELOWANIA TOPOGRAFII POWIERZCHNI

Przed przystąpieniem do opracowywania metodyki matematycznego modelowania topografii powierzchni założono, że modelowanie musi się odbywać ze wsparciem komputerowym i winno spełniać następujące wymagania:

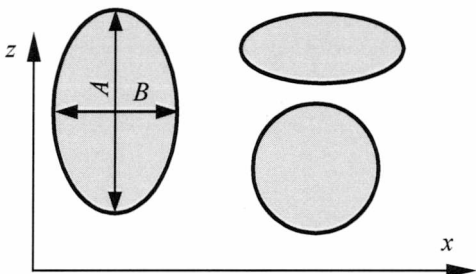
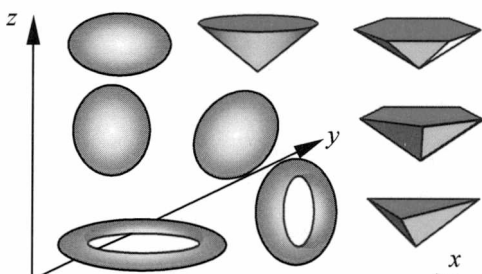
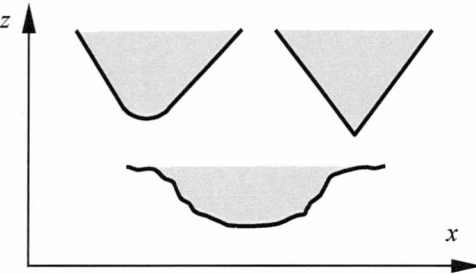
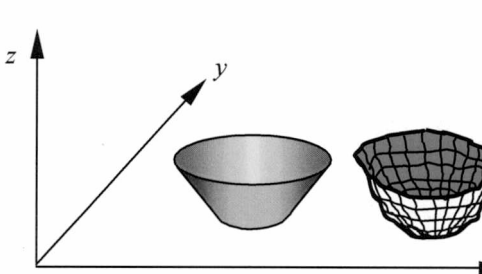
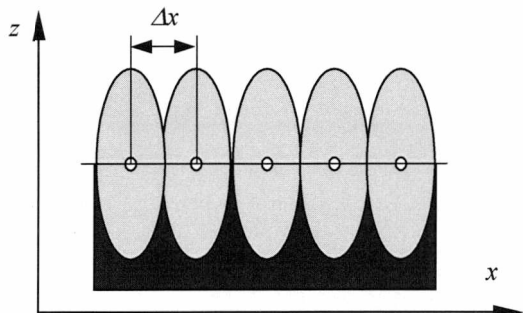
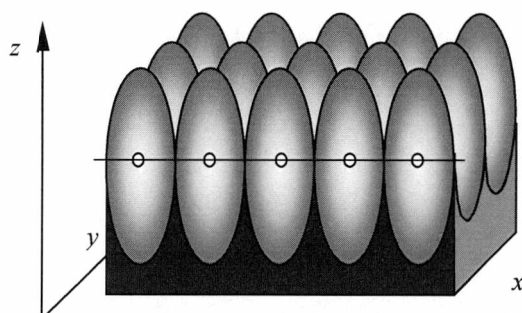
- Wielkość powierzchni i jej parametrów wysokościowych i horyzontalnych powinna dać się ściśle określać.
- Powinna istnieć możliwość uzyskiwania możliwie szerokiego spektrum kształtów powierzchni, w tym powierzchni o strukturach bardzo zbliżonych do uzyskiwanych w warunkach rzeczywistych.
- Modelowanie powierzchni powinno być możliwe w układzie płaskim i przestrzennym.
- Kształt elementarny (KE)*, odwzorowywany wielokrotnie na powierzchni, powinien dać się opcjonalnie definiować jako jedna z podstawowych, parametryzowanych brył geometrycznych, takich jak: kula, elipsoida, torus, stożek, ostrosłup o podstawie wielokąta foremnego. Powinna istnieć także możliwość indywidualnego zaprojektowania matematycznego, kształtu elementarnego o dowolnej geometrii lub wprowadzeniu jego geometrii do programu, po uprzednim odwzorowaniu go z kształtu rzeczywistego np. za pomocą skanowania z użyciem profilografometru (np. odwzorowanie krateru po wyładowaniu elektroerozyjnym lub śladu powstałego po uderzeniu ziarnem ściernym).
- Kształt elementarny powinien dać się wielokrotnie odwzorowywać na modelowanej powierzchni, w sposób regularny, z określonymi odstępami, symulujący drgania harmoniczne w trzech osiach lub zakłócenia losowe o dowolnej wartości.
- Powinna istnieć możliwość odwzorowywania kształtu elementarnego na modelowanej powierzchni także w sposób ciągły (np. symulujący skrawanie zdefiniowanym ostrzem) wzdłuż linii prostych i sinusoidalnych, przebiegających pod dowolnym kątem oraz po okręgach o osiach prostopadłych lub równoległych do modelowanej powierzchni. Powinna istnieć możliwość przesuwania fazowego przebiegów sinusoidalnych śladów.

* KE-Kształt Elementarny –figura bądź bryła geometryczna stanowiąca podstawowy element składowy modelowanych profili 2D czy powierzchni 3D.

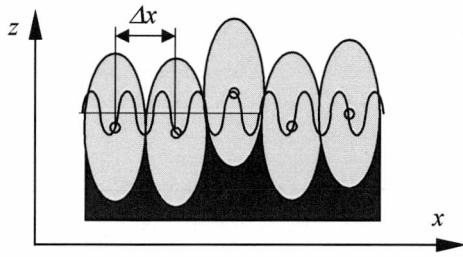
- Położenie odwzorowywanego kształtu elementarnego powinno dać się dowolnie zakłócać składową harmoniczną bądź losową w 3 osiach.
- Ślad (tor) kształtu elementarnego oraz powierzchnia globalna powinny dać się modyfikować funkcją sinus i wielomianami n -tego stopnia (np. celem uzyskania pochyleń, krzywizny, falistości itp.).
- W przypadku układu 3D modelowanie powierzchni powinno umożliwiać uzyskiwanie składania profili o różnym, dowolnie ustawialnym, kącie kierunku struktur wyjściowych (np. śladów obróbki).
- Powinno być możliwe nakładanie dowolnych zakłóceń losowych lokalnie na zdeterminowany kształt elementarny (KE) odwzorowujący się w powierzchni (np. symulujące szczybatość ostrza skrawającego), a także globalnie na zamodelowaną już powierzchnię.
- Modelowanie powinno dać możliwość wykonywania wielokrotnych, podstawowych operacji matematycznych na kształtach elementarnych i powierzchniach globalnych, np.: dodawania, odejmowania, mnożenia przez siebie profili, wybór minimalnej lub maksymalnej wartości z kilku zbiorów profili, w tym „obcinania” zarysów od góry (symulacja zużycia), inwersji, itp.
- Zamodelowane powierzchnie powinny dać się wygenerować w postaci stabilizowanej, umożliwiającej ich graficzną wizualizację i analizę matematyczną, w tym z użyciem programów do obliczania parametrów chropowatości.
- Zamodelowane powierzchnie wirtualne powinny dać się przedstawić w takiej postaci, jak wyglądałyby one po zmierzeniu ich profilografometrem odwzorowującym zarys powierzchni za pomocą igły diamentowej o określonej geometrii, czyli powinna być umożliwiona symulacja „filtracji mechanicznej”.
- Modelowanie powierzchni powinno być wsparte programem komputerowym nie wymagającym od użytkownika dużej wiedzy informatycznej i matematycznej.

Na podstawie powyższych założeń zaproponowano następującą metodykę matematycznego modelowania profili i powierzchni (tabela 5.2):

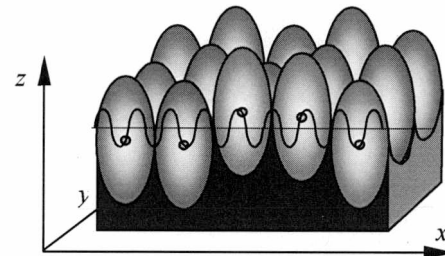
Tabela 5.2. Metodyka matematycznego modelowania profili i powierzchni

I. Deklarowanie długości profilu lub wielkości modelowanego pola.	
II. Definiowanie figury kształtu elementarnego KE (dla układu 2D) lub bryły (dla układu 3D), który będzie odwzorowywany wielokrotnie na tworzonej powierzchni.	
2D	3D
Podstawowe figury geometryczne KE to: • elipsy z parametryzowanymi osiami A i B 	Podstawowe bryły geometryczne KE, z parametryzowanymi wymiarami, takie jak: • kule, elipsoidy, torus, stożki, ostrosłupy o podstawie wielokąta foremnego 
• dowolne figury zaprojektowane lub zeskanowane, np. 	• dowolne bryły zaprojektowane lub zeskanowane, np. 
III. Wybór sposobu odwzorowywania kształtu elementarnego KE na modelowanej powierzchni.	
Dyskretny, regularny, z określonymi odstępami Δx 	Dyskretny, regularny, z określonymi odstępami Δx i Δy 

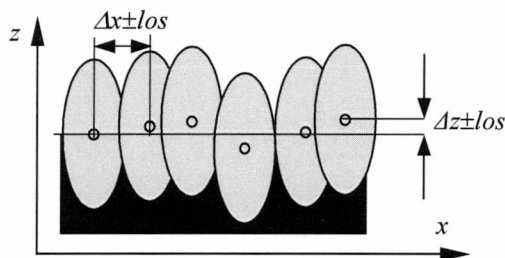
Dyskretny, z drganiami harmonicznymi wzdłuż osi x



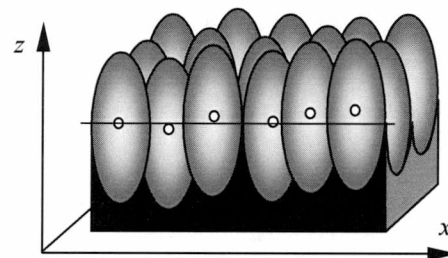
Dyskretny, z drganiami harmonicznymi wzdłuż osi x i y



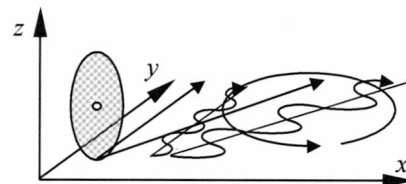
Dyskretny, z przemieszczeniami losowymi Δz w osi z i zakłóceniami losowymi odstępów Δx wzdłuż osi x



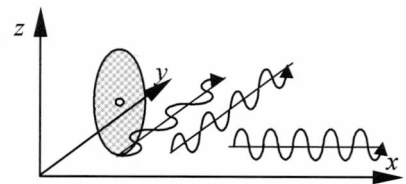
Dyskretny, z przemieszczeniami losowymi Δz w osi z i zakłóceniami losowymi odstępów Δx i Δy wzdłuż osi x i y



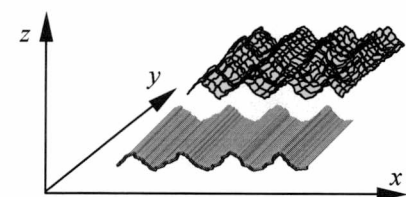
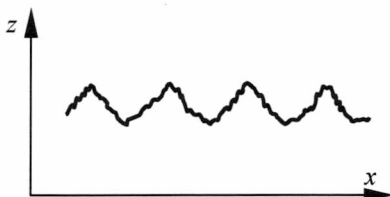
Odwzorowywanie ciągle KE po okręgu lub wzdłuż linii prostych sinusoidalnych usytuowanych pod różnymi kątami na płaszczyźnie X-Y



Zakłócanie toru KE drganiami w płaszczyznach X-Y, X-Z, Y-Z



IV. Nadanie zakłóceń losowych (szumu).



V. Składanie i operacje matematyczne (analogicznie do pokazanych w tabeli 5.1).

5.3. OPROGRAMOWANIE DO MODELOWANIA POWIERZCHNI

5.3.1. MOŻLIWOŚCI MODELOWANIA PROFILI 2D I POWIERZCHNI 3D

Podczas prac nad programem założono, że powinien on umożliwiać tworzenie różnorodnych struktur, w tym struktur jak najbardziej przybliżonych do tych, jakie otrzymywane są w warunkach rzeczywistych. Powinien także umożliwiać pozyskiwanie danych do badań, które ze znanych parametrów chropowatości powierzchni najbardziej adekwatnie opisują określone, wybrane cechy struktury geometrycznej powierzchni. Według przedstawionej metodyki, wykorzystując oprogramowanie Matlab [70], [111], opracowano program komputerowy *modelowanie_skr*, którego zadaniem było wsparcie obliczeń służących do modelowania topografii powierzchni. Program został opracowany w Instytucie Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej.

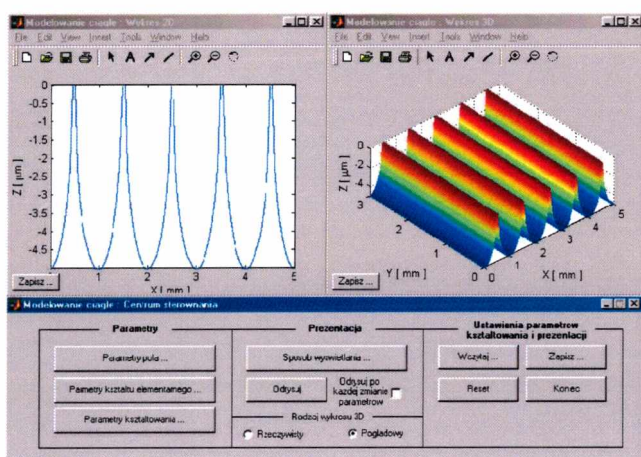
Program umożliwia uwzględnienie, w kształtowaniu struktur powierzchni, symulacji oddziaływania wielu czynników, mających wpływ na konstytuowanie się technologicznej warstwy wierzchniej. Jego uniwersalizm umożliwia zamodelowanie wielu stanów powierzchni występujących w różnych procesach obróbki ubytkowej i bezubytkowej. Program umożliwia modelowanie powierzchni według dwóch metod:

- Poprzez odwzorowanie w kształtowanej powierzchni śladów obróbkowych w sposób ciągły (najczęściej stosowanym kształtem elementarnym jest w tym przypadku elipsa). Jako kształtów elementarnych można też użyć innych dowolnych krzywych zaprojektowanych wirtualnie, bądź zeskanowanych z rzeczywistych modeli. Wymiary charakterystyczne tych krzywych oraz ich kształt można zmieniać w sposób ściśle określony lub losowy. Odwzorowywanie może odbywać się w sposób regularny lub z zakłóceniami. Na kształt elementarny może zostać nałożony szum (odwzorowujący szczyrbatość ostrza), a także możliwe są zakłócenia losowe jego wielkości, wysokości i położenia. Dodatkowo wprowadzać można zakłócenia harmoniczne w płaszczyznach X-Y, X-Z, i Y-Z. Zakłócenia harmoniczne mogą być dodatkowo przesunięte względem siebie w fazie o dowolną wartość φ . Metoda ta pozwala symulować kształtowanie kinematycznie - geometryczne, np. za pomocą toczenia, szlifowania obwodowego, gładzenia itp.
- Poprzez dyskretne „bezwplywkowe odciskanie” w materiale brył (kształtu elementarnego – KE) takich jak, elipsoidy, torusy, ostrosłupy, stożki. Wymiary charakterystyczne tych brył oraz ich kształt można zmieniać. Jako kształtów elementarnych można też użyć innych, dowolnych, brył zaprojektowanych wirtualnie,

bądź zeskanowanych z rzeczywistych modeli. Odwzorowywanie może odbywać się w sposób regularny lub losowy – z możliwością zakłócania położenia czy wielkości brył elementarnych. Metoda ta pozwala na symulowanie kształtowania, np. za pomocą obróbek erozyjnych, strumieniowo-ściernych, kulowania, nagniatania itp.

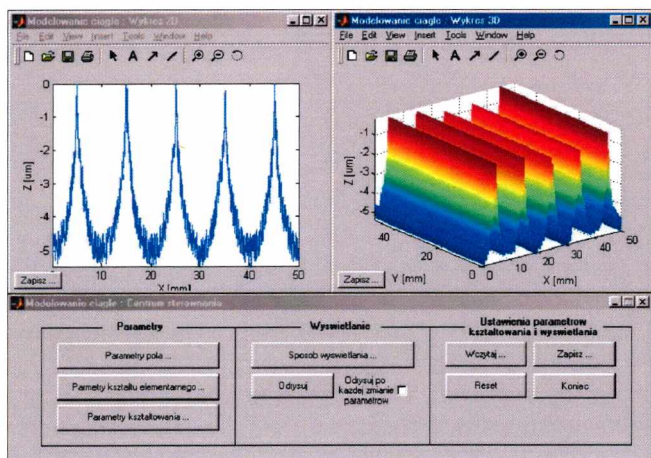
Oprogramowanie pozwala na modelowanie struktur chropowatości zarówno 2D (pojedynczych profili), jak i 3D (fragmentów powierzchni). Stwarza ono możliwość pełnej dowolności w doborze wielkości pola modelowanej powierzchni, stopnia jej dyskretyzacji i zamierzonej deformacji.

Na rysunku 5.1 pokazano przykład powierzchni zdeterminowanej, zamodelowanej bez zakłóceń.



Rys.5.1. Przykład powierzchni zdeterminowanej modelowej (bez zakłóceń)

Kształt elementarny można zakłócać. Przykładem takiej operacji jest jego „zaszumienie”. Widok powierzchni wygenerowanej z nałożonym szumem na kształt elementarny pokazano na rys.5.2.

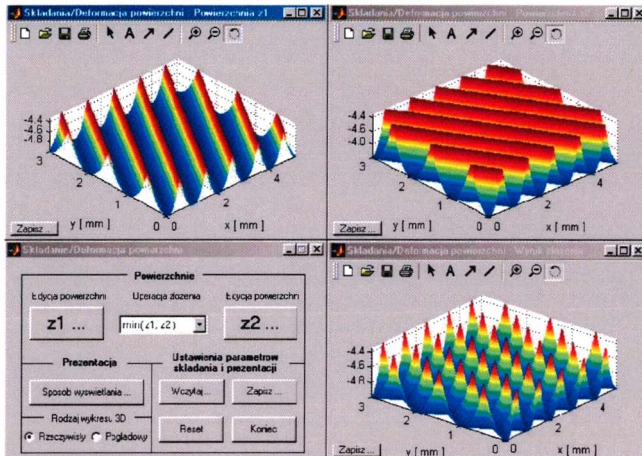


Rys.5.2. Przykład wpływu zaszumienia kształtowania powierzchni zdeterminowanych

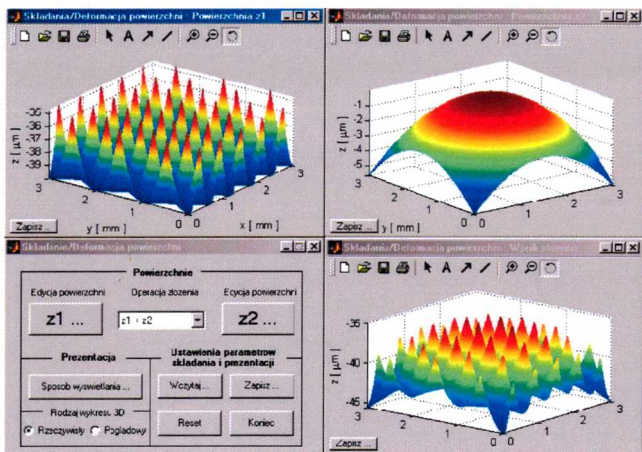
Dodatkową opcją, wzbogacającą opracowany program, jest możliwość obracania zamodelowanej powierzchni o dowolny kąt, tak w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek

zegara, jak i w przeciwnym. Przykładowe powierzchnie tak zamodelowane i ich złożenie pokazano na rys.5.3.

Zamodelowane powierzchnie można także wielokrotnie składać ze sobą (rys.5.3, 5.4, 5.5). Dzięki tym możliwościom można symulować i obserwować zmiany stanu geometrycznej warstwy wierzchniej wraz z nakładaniem się na siebie kolejnych operacji obróbkowych.



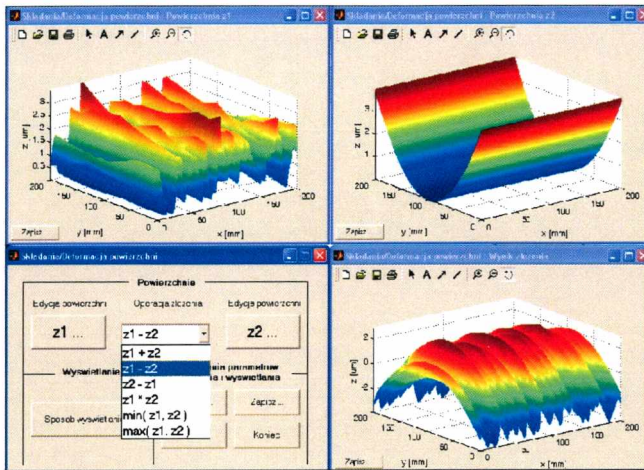
Rys.5.3. Powierzchnia powstała przez złożenie dwóch obróconych o 45° powierzchni zdeterminowanych



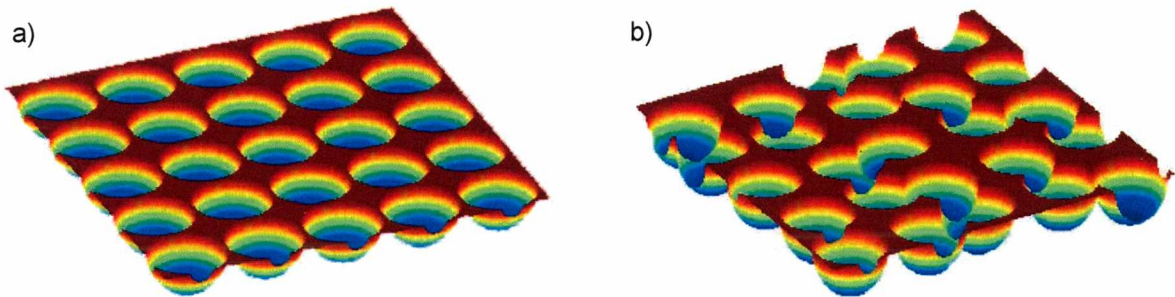
Rys.5.4. Efekt „jeża” - powierzchnia powstała poprzez złożenie powierzchni z rys.5.3 i fragmentu czaszy kulistej

Na rysunku 5.5 pokazano przykład złożenia powierzchni zdeterminowanej, na której występują zakłócenia wielkości i położenia kształtu elementarnego (elipsoidy) oraz powierzchni zakrzywionej. Zamodelowane powierzchnie można opcjonalnie: dodawać, odejmować, uzyskiwać ich iloczyn, a także wartość minimalną i maksymalną obu z nich. Dostępne opcje składania powierzchni pokazano w dolnej lewej części rysunku.

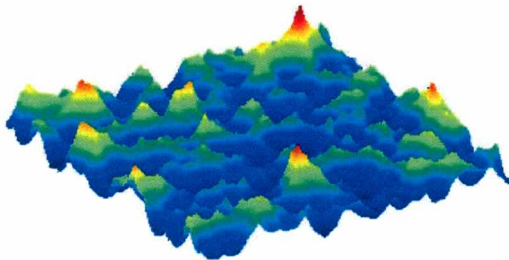
Przy modelowaniu powierzchni losowych wykorzystać można następujące opcje zakłócania kształtu elementarnego KE: zakłócenie położenia KE na płaszczyźnie X - Y (rys.5.6), zakłócenie zagłębienia odcisniętego śladu w osi z, zakłócenie wielkości kształtu elementarnego, nałożenie szumu na kształt elementarny. Możliwe jest również sterowanie liczbą odcisniętych śladów. Przykładowy efekt zastosowania wszystkich tych zakłóceń pokazano na rys.5.7.



Rys.5.5. Efekt składania powierzchni płaskiej i krzywoliniowej



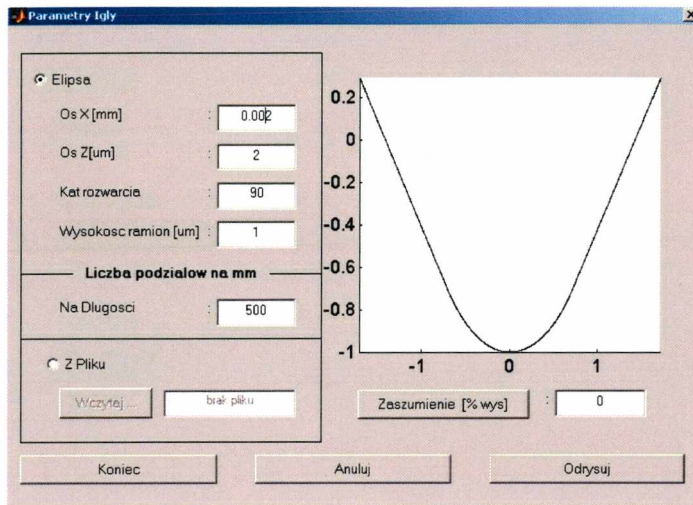
Rys.5.6. Przykład wpływu zakłóceń na efekt kształtowania powierzchni losowych:
a) kształt elementarny, elipsoida bez zakłóceń, b) wprowadzone zakłócenia położenia elipsoid w płaszczyźnie poziomej przy takiej samej liczby elipsoid



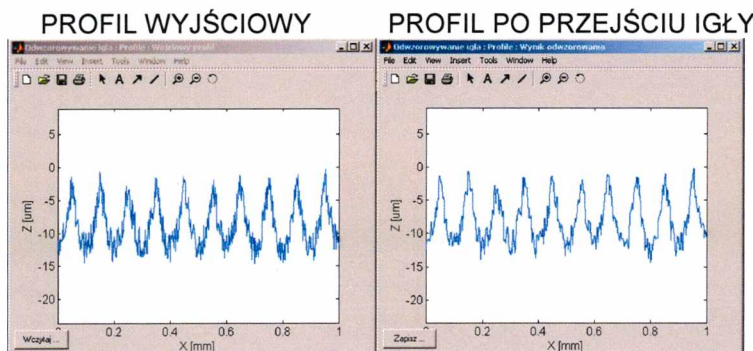
Rys.5.7. Efekt wprowadzenia wszystkich dostępnych w programie *modelowanie_skr* zakłóceń procesu kształtowania powierzchni za pomocą elipsoid

5.3.2. MODELOWANIE SKANOWANIA POWIERZCHNI ZA POMOCĄ IGŁY POMIAROWEJ

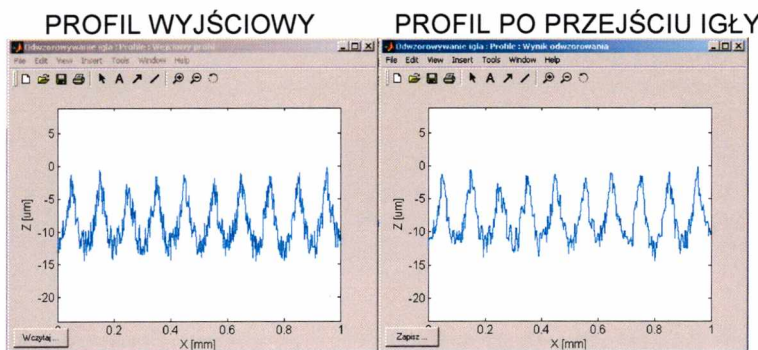
Opracowany program *modelowanie_skr* umożliwia także zamodelowanie oddziaływania swoistego filtra mechanicznego, jakim jest skanowanie powierzchni za pomocą igły pomiarowej profilografometru stykowego. Na rysunku 5.8 pokazano przykładowy kształt modelu igły pomiarowej 2D, natomiast na rys. 5.9 ÷ 5.13 wpływ promienia końcówki pomiarowej R_{KP} oraz kąta wierzchołkowego igły odwzorowującej α_{KP} na dokładność odwzorowania mierzonego profilu chropowatości.



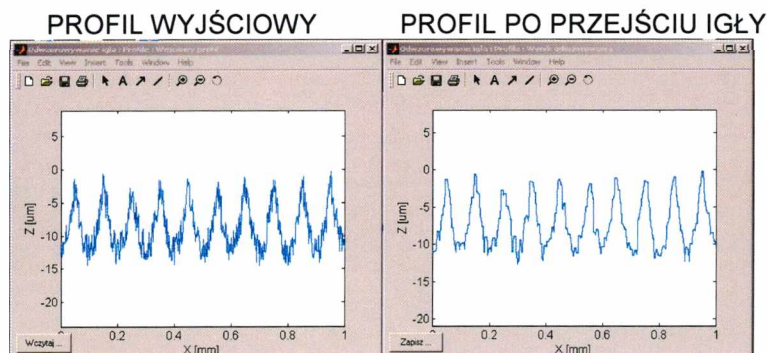
Rys.5.8. Przykładowy kształt modelu igły pomiarowej 2D o promieniu zaokrąglenia igły $RKP=2\mu\text{m}$ i kącie wierzchołkowym $\alpha_{KP}=90^\circ$



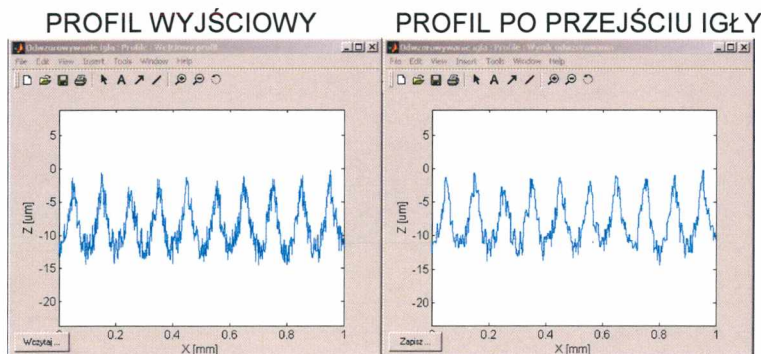
Rys.5.9. Filtrujące działanie igły pomiarowej dla $RKP=1\mu\text{m}$, $\alpha_{KP}=90^\circ$



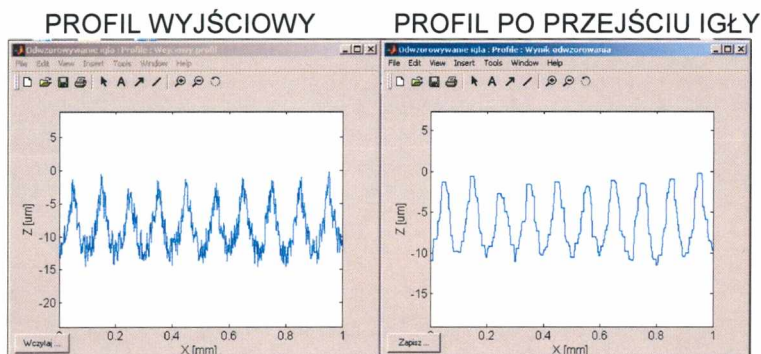
Rys.5.10. Filtrujące działanie igły pomiarowej dla $RKP=2\mu\text{m}$, $\alpha_{KP}=90^\circ$



Rys.5.11. Filtrujące działanie igły pomiarowej dla $RKP=5\mu\text{m}$, $\alpha_{KP}=90^\circ$



Rys.5.12. Filtrujące działanie igły pomiarowej dla $RKP=5\mu\text{m}$, $\alpha KP=60^\circ$



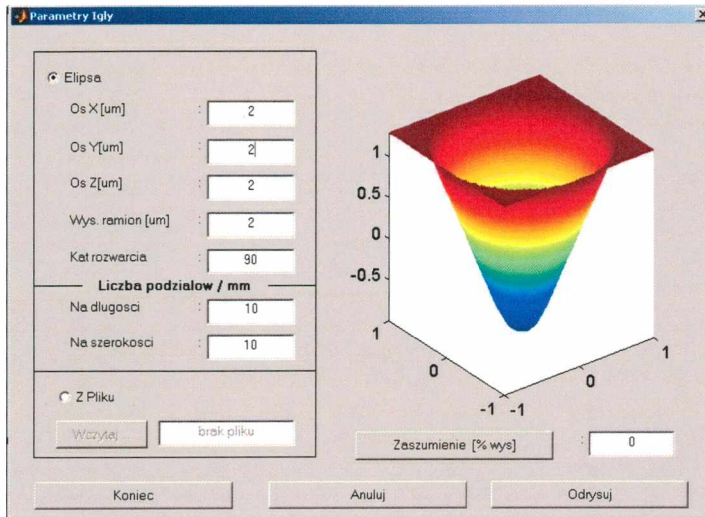
Rys.5.13. Filtrujące działanie igły pomiarowej dla $RKP=5\mu\text{m}$, $\alpha KP=120^\circ$

W tabeli 5.3. pokazano wpływ promienia końcówki pomiarowej RKP oraz kąta wierzchołkowego ostrza odwzorowującego αKP na wartości podstawowych parametrów chropowatości 2D.

Tabela 5.3. Porównanie parametrów chropowatości 2D dla różnych wielkości zamodelowanej igły pomiarowej

	Profil wyjściowy	$RKP\ 1\ \mu\text{m}$ $\alpha KP\ 90^\circ$	$RKP\ 2\ \mu\text{m}$ $\alpha KP\ 90^\circ$	$RKP\ 5\ \mu\text{m}$ $\alpha KP\ 90^\circ$	$RKP\ 5\ \mu\text{m}$ $\alpha KP\ 60^\circ$	$RKP\ 5\ \mu\text{m}$ $\alpha KP\ 120^\circ$
$Ra\ [\mu\text{m}]$	2.73	2.67	2.58	1.65	2.62	1.70
$Rq\ [\mu\text{m}]$	3.25	3.14	2.95	1.85	3.05	2.03
$Rp\ [\mu\text{m}]$	8.32	7.18	5.91	5.07	7.85	4.97
$Rv\ [\mu\text{m}]$	6.11	5.38	4.49	3.84	3.05	3.41
$Rt\ [\mu\text{m}]$	14.43	12.57	10.40	8.91	10.90	8.38
Rsk	0.47	0.51	0.47	-0.08	0.28	0.47
Rku	2.20	2.10	1.86	1.60	2.05	2.20

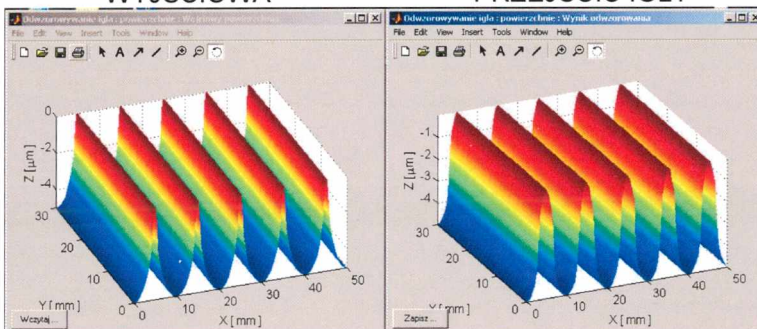
Na rysunku 5.14 pokazano przykładowy kształt modelu igły pomiarowej 3D, natomiast na rys. 5.15 ÷ 5.19 wpływ promienia końcówki pomiarowej RKP oraz kąta wierzchołkowego ostrza odwzorowującego αKP na dokładność odwzorowania mierzonego profilu chropowatości.



Rys.5.14. Przykładowy kształt modelu igły pomiarowej 3D o promieniu zaokrąglenia igły $RKP=2\mu\text{m}$ i kącie wierchołkowym $\alpha_{KP}=90^\circ$

POWIERZCHNIA
WYJŚCIOWA

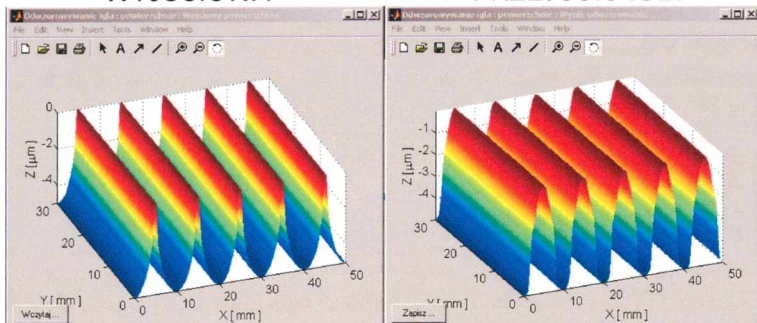
POWIERZCHNIA PO
PRZEJŚCIU IGŁY



Rys.5.15. Filtrujące działanie igły pomiarowej dla $RKP=1\mu\text{m}$, $\alpha_{KP}=90^\circ$

POWIERZCHNIA
WYJŚCIOWA

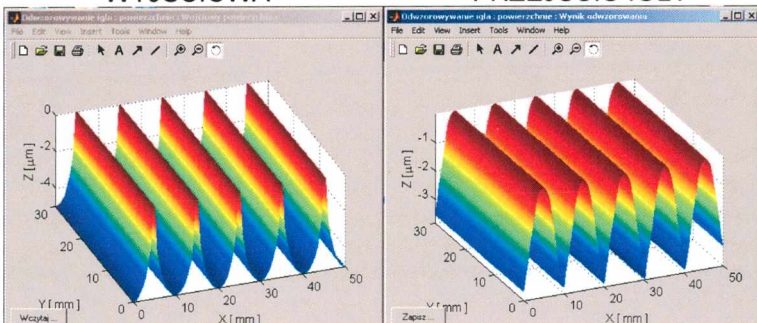
POWIERZCHNIA PO
PRZEJŚCIU IGŁY



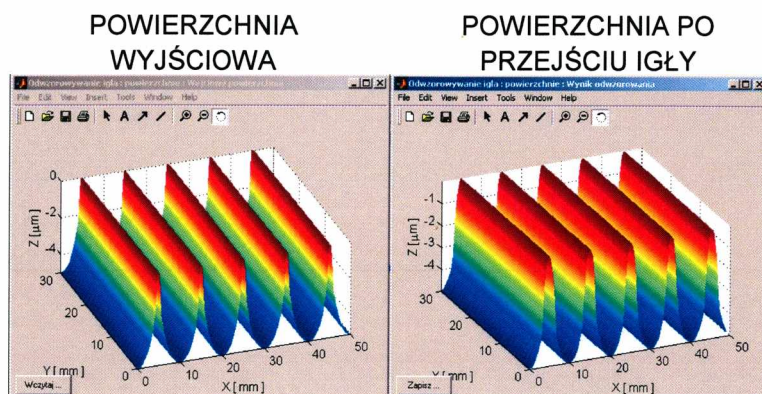
Rys.5.16. Filtrujące działanie igły pomiarowej dla $RKP=2\mu\text{m}$, $\alpha_{KP}=90^\circ$

POWIERZCHNIA
WYJŚCIOWA

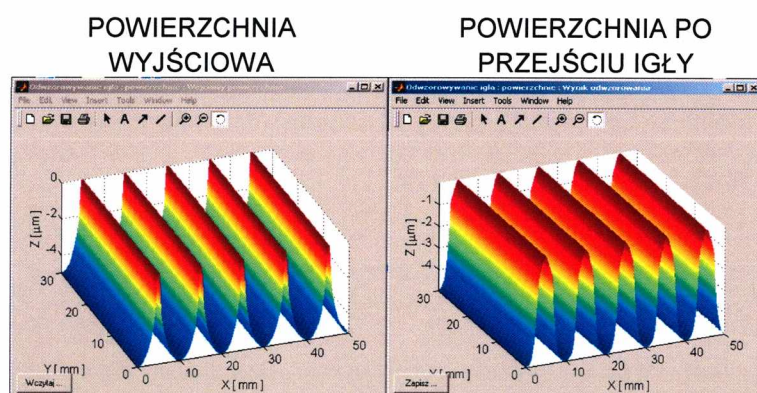
POWIERZCHNIA PO
PRZEJŚCIU IGŁY



Rys.5.17. Filtrujące działanie igły pomiarowej dla $RKP=5\mu\text{m}$, $\alpha_{KP}=90^\circ$



Rys.5.18. Filtrujące działanie igły pomiarowej dla $RKP=1\mu\text{m}$, $\alpha KP=60^\circ$



Rys.5.19. Filtrujące działanie igły pomiarowej dla $RKP=1\mu\text{m}$, $\alpha KP=120^\circ$

W tabeli 5.4. pokazano wpływ promienia końcówki pomiarowej RKP oraz kąta wierzchołkowego ostrza odwzorowującego αKP na wartości podstawowych parametrów chropowatości 3D.

Tabela 5.4. Porównanie parametrów chropowatości 3D dla różnych wielkości zamodelowanej igły pomiarowej

	Powierzchnia wyjściowa	$RKP\ 1\ \mu\text{m}$ $\alpha KP\ 90^\circ$	$RKP\ 2\ \mu\text{m}$ $\alpha KP\ 90^\circ$	$RKP\ 5\ \mu\text{m}$ $\alpha KP\ 90^\circ$	$RKP\ 1\ \mu\text{m}$ $\alpha KP\ 60^\circ$	$RKP\ 1\ \mu\text{m}$ $\alpha KP\ 120^\circ$
$Sa\ [\mu\text{m}]$	1.15	1.86	1.72	1.2	1.75	1.84
$Sq\ [\mu\text{m}]$	1.42	1.97	1.89	1.37	1.91	1.96
$Sp\ [\mu\text{m}]$	3.66	2.79	2.41	1.92	3.02	2.33
$Sv\ [\mu\text{m}]$	1.33	2.20	2.59	2.52	1.97	2.66
$St\ [\mu\text{m}]$	4.99	4.99	4.99	4.44	4.99	4.99
Ssk	1.16	0.23	-0.21	-0.12	0.51	-0.19
Sku	3.23	1.31	1.43	1.71	1.57	1.31

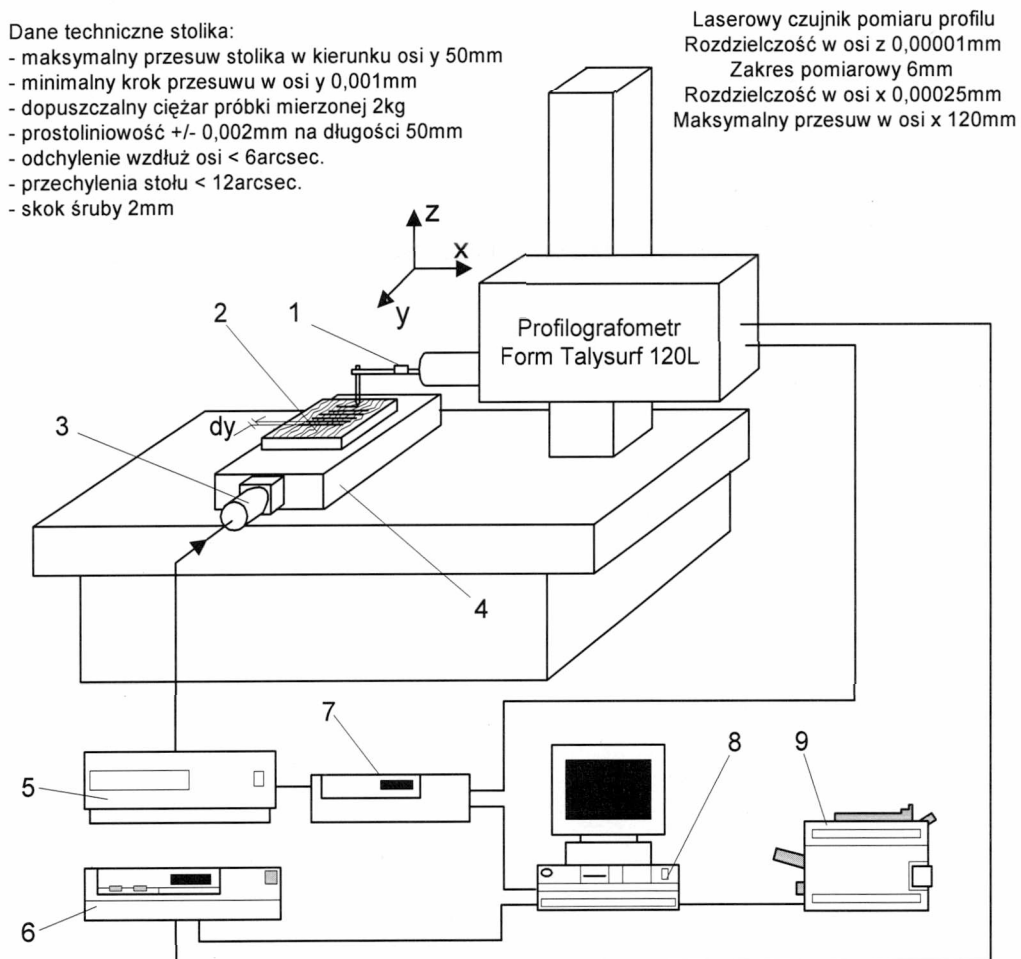
Program umożliwia także przesyłanie zamodelowanych profili 2D i powierzchni 3D w postaci stabilizowanej do profilografometrów, np. FORM TALYSURF 120L, w celu przeprowadzenia, za pomocą oprogramowania będącego na wyposażeniu profilografometru, analiz i obliczeń parametrów chropowatości i falistości wygenerowanych powierzchni.

Możliwości zastosowania programu *modelowanie_skr* do badań zostały przedstawione przez autora rozprawy w referatach konferencyjnych [11], [12], [13], [15] oraz podczas

Konwersatorium „Stereometria powierzchni: Pomiary, badania, aplikacje”, które odbyło się w Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych Instytutu Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej w dniach 4 - 5 grudnia 2003r.

5.3.3. WERYFIKACJA DZIAŁANIA PROGRAMU

W celu zweryfikowania działania programu wykonano przykładowe, rzeczywiste powierzchnie: losowe, zdeterminowane oraz płaskowierzchołkowe typu „plateau”. Następnie powierzchnie te zeskanowano w celu wyznaczenia parametrów chropowatości. Do skanowania i analizy wyników wykorzystano profilografometr FORM TALYSURF–120 L firmy Taylor Hobson Limited (rys.5.20).



Rys. 5.20. Schemat układu do stereometrycznych pomiarów mikrostruktury powierzchni:
1-końcówka pomiarowa, 2-przedmiot mierzony, 3-silnik krokowy model: 50SMC2N-KW100,
4-stolik model: Aerotech, INC. ATS 100-50-U-20P, 5-sterowanie stolika Unitex 100, 6-
zasilacz czujnika laserowego, 7-elektroniczny moduł oprogramowania komputera,
8-komputer Dell Pentium III (Windows NT) z oprogramowaniem: 3D Talymap Expert
v.2.0.19; 2D Ultra rev 6.0, 9-drukarka

Pomiar powierzchni rzeczywistych przeprowadzono na powierzchni pomiarowej o wymiarach 1,28×1,28 mm.

Za pomocą programu *modelowanie_skr* starano się zamodelować powierzchnie o cechach geometrycznych możliwie jak najbardziej zbliżonych do powierzchni rzeczywistych użytych do badań.

Pozyskane w ten sposób dane wczytano do bazy danych programu TalyMap Expert, obsługującego profilografometr Taylor Hobson. Za pomocą tego samego oprogramowania obliczono parametry chropowatości powierzchni zamodelowanych, jak i zmierzonych powierzchni rzeczywistych. Pozwoliło to uniknąć możliwych przekłamań wynikających np. z interpretacji formuł matematycznych definiujących poszczególne parametry chropowatości, gdyby chciał je liczyć odrębnymi programami. Wyniki tych badań przedstawiono w kolejnych rozdziałach 5.3.3.1 ÷ 5.3.3.3.

5.3.3.1. PORÓWNANIE TOPOGRAFII POWIERZCHNI LOSOWYCH – RZECZYWISTYCH I MODELOWYCH

Modelując powierzchnie powstające poprzez losowe odcisnięcie ziarna ściernego starano się jak najwierniej odtworzyć warunki rzeczywiste, uwzględniając:

- wielkość ziarna, różną dla poszczególnych zabiegów,
- losowość wyboru miejsca uderzenia ziarna,
- wprowadzenie zakłóceń losowych („szczerbatości”) na powierzchniach modelowych ziaren ściernych,
- losową głębokość penetracji poszczególnych ziaren ściernych,
- losową wielkość ziarna stosowanego w każdym z zabiegów.

Dodatkowo na modelowaną powierzchnię nałożono globalnie szum, symulujący inne losowe czynniki, których nie uwzględniono wcześniej, a które występują podczas rzeczywistej obróbki, takie jak na przykład: niejednorodności materiału obrabianego, wypłytki materiału wokół śladów po ziarnach ściernych, itp.

Przyjęto, że modelowana powierzchnia ma być podobna do tej jaką uzyskuje się po obróbce strumieniowo-ściernej, np. podobna do takiej jaka jest na powierzchni wzorca malarskiego. Powierzchnia wzorca była obrabiana na sucho, ziarnem elektrokorundowym o numerach 70 i 22, przy kącie padania strumienia ok.30°. Materiałem obrabianym była stal 55.

Kształtem modelowanego ziarna ściernego, odwzorowującego ślad na powierzchni, będzie elipsoida o osiach o długości odpowiednio 250×250×250µm dla obróbki ziarnem drobnym oraz 1000×1000×1000µm przy obróbce ziarnem grubym.

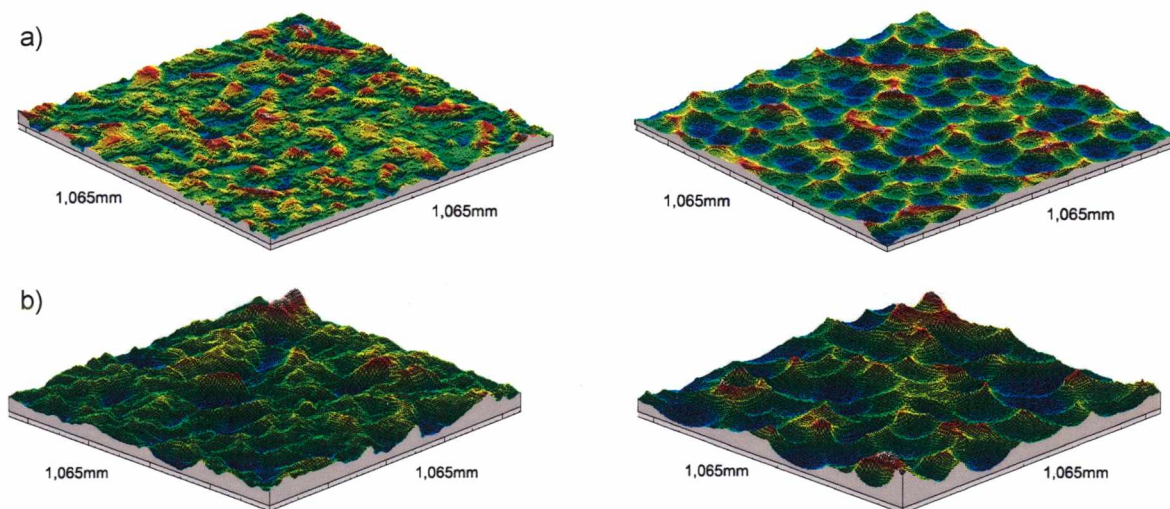
Wielkości elipsoid, będących modelowymi ziarnami, poddano zakłóceniom losowym w zakresie 15-20 % ich wymiarów, a na zarysy nałożono szum (szczerbatość) o wartości 0,5 % wysokości kształtu elementarnego ich wymiaru pionowego.

Dodatkowo zakłócano wielkość zagłębienia oraz położenie odcisków kształtów elementarnych na modelowanej powierzchni.

Na rysunku 5.21 przedstawiono przykłady obrazów powierzchni otrzymanych z pomiaru stereometrycznego powierzchni rzeczywistej wzorca malarskiego obrobionego strumieniowo-ściernie i powierzchni modelowej. Powierzchnia rzeczywista została zmierzona 5 razy, a w tabeli podano wartość średnią parametrów obliczoną z 5 pomiarów.

POWIERZCHNIA RZECZYWISTA WZORCA

POWIERZCHNIA MODELOWA



Rys.5.21. Obrazy powierzchni wzorca malarskiego i powierzchni modelowych: a) obróbka drobnym ziarnem, b) obróbka grubym ziarnem

W tabeli 5.5. przedstawiono porównanie wyników chropowatości powierzchni rzeczywistych i modelowych pokazanych na rys.5.21.

Tabela 5.5. Porównanie wyników pomiarów chropowatości powierzchni rzeczywistych i modelowych wzorca malarskiego

Parametry chropowatości	Drobne ziarno		Grube ziarno	
	Powierzchnia rzeczywista	Powierzchnia modelowa	Powierzchnia rzeczywista	Powierzchnia modelowa
Sa [μm]	3,67	2,45	4,08	3,14
Sq [μm]	4,68	2,56	5,20	3,18
Sp [μm]	21,3	18,2	23,19	18,71
Sv [μm]	21,29	19,42	14,91	10,34
St [μm]	42,59	37,62	38,1	29,06
Ssk	0,03	0,25	0,83	0,71
Sku	3,65	2,71	3,64	3,18
Współczynnik korelacji ρ	0,99		0,99	

Otrzymany współczynnik korelacji między zbiorami danych składających się ze stereometrycznych parametrów chropowatości powierzchni rzeczywistych i modelowych wyniósł dla obu powierzchni $\rho=0,99$.

5.3.3.2. PORÓWNANIE TOPOGRAFII POWIERZCHNI ZDETERMINOWANYCH – RZECZYWISTYCH I MODELOWYCH

Do badań porównawczych powierzchni o dużym stopniu zdeterminowania, przyjęto powierzchnie uzyskane po toczeniu w następujących warunkach: żeliwo szare EN-GJL-150 ($v_c=150\text{m/min}$, $f=0,15\text{mm/obr}$, $a_p=0,5\text{mm}$, $r_\epsilon=0,4\text{mm}$, nóż tokarski NNBtP2525, płytki TPUN 160304, materiał płytki H10) i stali 55 ($v_c=150\text{m/min}$, $f=0,3\text{mm/obr}$, $a_p=0,5\text{mm}$, $r_\epsilon=0,4\text{mm}$, nóż tokarski NNBtP2525, płytki TPUN 160304, materiał płytki S20).

Modelując powierzchnie toczone starano się odtworzyć, w możliwie wierny sposób, rzeczywiste warunki kinematyczno-geometryczne kształtowania powierzchni. Zaliczyć do nich można:

- odwzorowanie kształtu wierzchołka ostrza skrawającego za pomocą elipsy,
- losowo zakłócany zarys kształtu ostrza skrawającego (szczerbatość),
- modelowanie drgań losowych narzędzia w trzech osiach,
- modelowanie drgań harmoniczných narzędzia w trzech osiach.

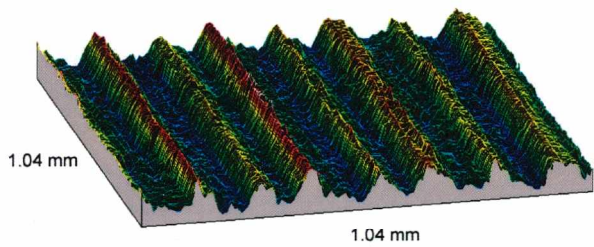
Dodatkowo na modelowaną powierzchnię nałożono globalnie szum, symulujący inne losowe czynniki, których nie uwzględniono wcześniej, a które występują podczas rzeczywistej obróbki, takie jak na przykład: niejednorodności materiału obrabianego.

Modelując powierzchnie toczone zastosowano „parametry” kinematyczno – geometryczne takie, jak te stosowane podczas obróbki rzeczywistej powierzchni.

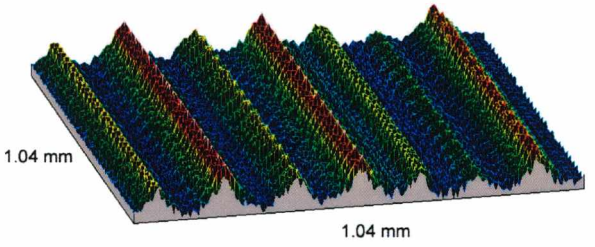
Kształt ostrza skrawającego zamodelowano za pomocą elipsy (kształt elementarny) na którą nałożono szum o wartości 3% wysokości kształtu elementarnego. Na tor narzędzia nałożono również zakłócenia harmoniczne w płaszczyźnie X-Y. Dodatkowo zakłócano wielkość zagłębienia kształtów elementarnych odwzorowywanej powierzchni.

Na rysunku 5.22 przedstawiono przykłady obrazów powierzchni otrzymanych z pomiaru stereometrycznego powierzchni rzeczywistej po toczeniu i powierzchni modelowej. Powierzchnia rzeczywista została zmierzona 5 razy, a w tabeli 5.6 podano wartość średnią parametrów obliczoną z 5 pomiarów.

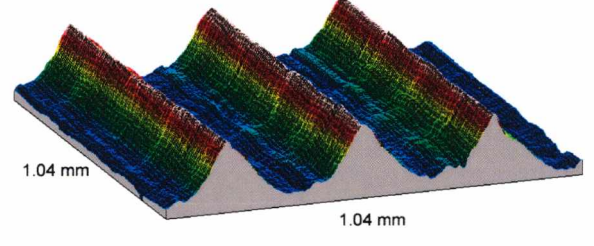
POWIERZCHNIA RZECZYWISTA (ŻELIWO)



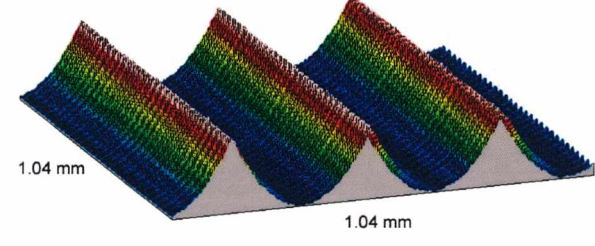
POWIERZCHNIA MODELOWA



POWIERZCHNIA RZECZYWISTA (STAL)



POWIERZCHNIA MODELOWA



Rys.5.22. Obrazy powierzchni toczonych i powierzchni modelowych

W tabeli 5.6. przedstawiono porównanie wyników chropowatości powierzchni rzeczywistych i modelowych pokazanych na rys.5.22.

Tabela 5.6. Porównanie wyników pomiarów chropowatości powierzchni toczonych rzeczywistych i powierzchni modelowych.

Parametry chropowatości	Powierzchnia żeliwna		Powierzchnia stalowa	
	Powierzchnia rzeczywista	Powierzchnia modelowa	Powierzchnia rzeczywista	Powierzchnia modelowa
Sa [μm]	1,19	1,52	4,65	5,38
Sq [μm]	1,4	1,88	5,46	6,47
Sp [μm]	5,11	6,9	13,4	17,2
Sv [μm]	3,44	3,17	9,07	8,56
St [μm]	8,55	10,07	22,5	25,8
Ssk	0,46	0,67	0,66	0,73
Sku	2,45	2,98	2,27	2,32
Współczynnik korelacji ρ	0,98		0,98	

I tym razem uzyskano wysoki stopień zgodności parametrów chropowatości opisujących powierzchnie rzeczywistą i modelową. Współczynnik korelacji był bliski jedności.

5.3.3.3. PORÓWNANIE TOPOGRAFII POWIERZCHNI

PŁASKOWIERZCHOŁKOWYCH TYPU „PLATEAU” – RZECZYWISTYCH
I MODELOWYCH

Do badań porównawczych topografii powierzchni płaskowierzchołkowych wybrano powierzchnię cylindra silnika wysokoprężnego. Powierzchnia rzeczywista była tworzona w gładzeniu dwuetapowym: w pierwszym etapie ziarnem ściernym o numerze 60, prędkość wrzeczona 100 obr/min, 80 skoków/min, w drugim zaś ziarnem o wielkości F320/29, prędkość wrzeczona 200 obr/min, 70 skoków/min.

Modelując powierzchnie typu "plateau" starano się, jak najwierniej, odtworzyć rzeczywiste warunki dwuzabiegowego gładzenia, uwzględniając:

- odwzorowanie złożonej kinematyki ruchu głowicy gładzarskiej względem przedmiotu obrabianego,
- wielkość ziarna, różną dla poszczególnych zabiegów,
- wprowadzenie zakłóceń losowych („szczerbatości”) na profilach modelowych (elipsach) ziaren ściernych osetki,
- losowy rozkład głębokość skrawania poszczególnymi ziarnami,
- losową wielkość ziaren w poszczególnych frakcjach oselek,
- losowe rozłożenie ziaren w osetce ścierniej.

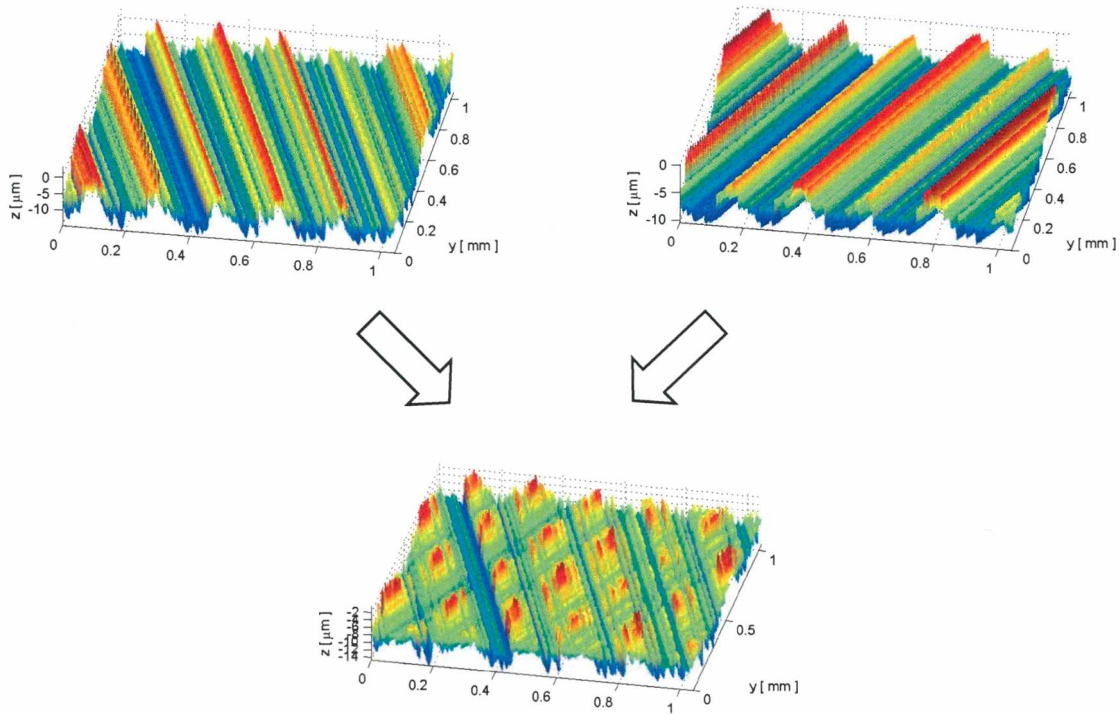
Dodatkowo, na powierzchnię nałożono globalnie szum, symulujący inne losowe czynniki, których nie uwzględniono w modelowaniu, a które występują podczas rzeczywistego gładzenia, takie jak: niejednorodności materiału obrabianego w postaci wydzieleni grafitu, wypłytki materiału wokół śladów po ziarnach ściernych, itp.

W celu zamodelowania powierzchni płaskowierzchołkowych przyjęto, że w symulacji gładzenia zgrubnego kształtem ziarna ściernego, odwzorowującego ślad na powierzchni obrobionej, będzie elipsa o osiach o długości 100 i 200 μm , odpowiadająca ziarnu ściernemu o numerze 60 (wymiar charakterystyczny ok. 300 μm). Podczas modelowania zabiegu obróbki wykańczającej, kształtem ziarna będzie elipsa o wymiarach osi 10 i 20 μm , odpowiadająca wielkości ziarna ściernego F320/29 (wymiar charakterystyczny ok. 30 μm).

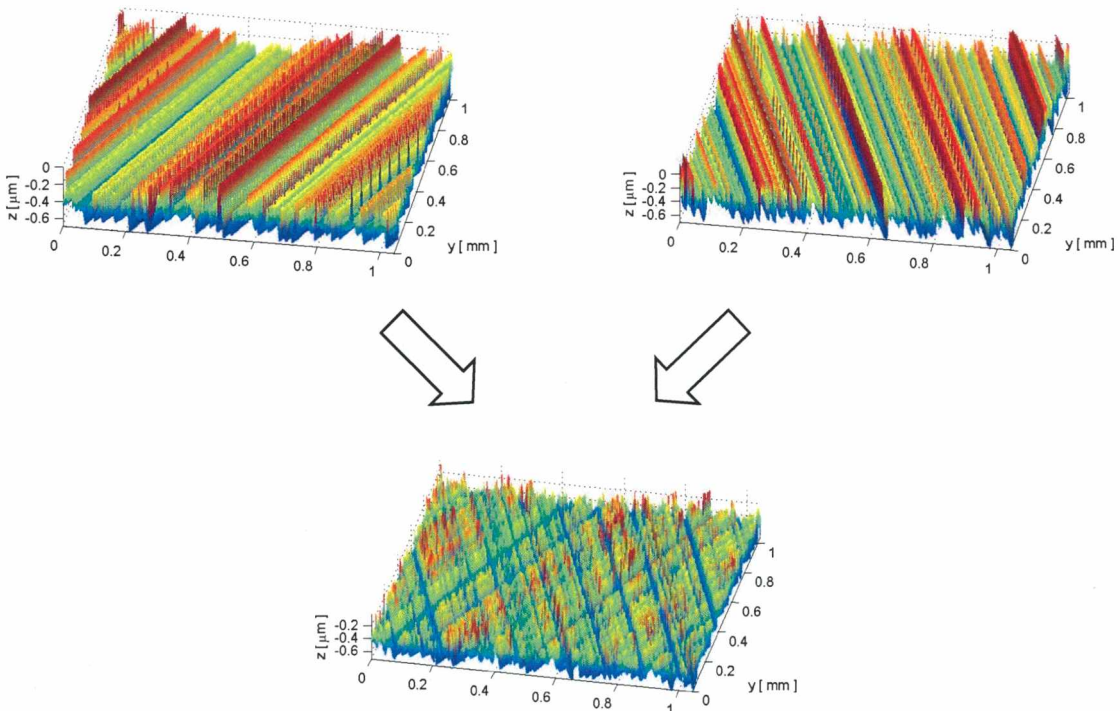
Wielkości obu elips, będących modelowymi ziarnami, poddano zakłóceniom losowym w zakresie 0–5 % ich wymiarów, a na zarysy nałożono szum (szczerbatość) o wartości 1 % wysokości kształtu elementarnego ich wymiaru pionowego.

Powierzchnie, o strukturze rys przecinających się pod kątem 40°, powstawały dzięki wykorzystaniu opcji „składania” powierzchni modelowych (rys. 5.23 i 5.24).

W pierwszej kolejności zamodelowano powierzchnie, starając się odwzorować topografię charakterystyczną taką, jak po gładzeniu zgrubnym (rys.5.23), a następnie powierzchnię, jak po gładzeniu wykańczającym (rys.5.24).

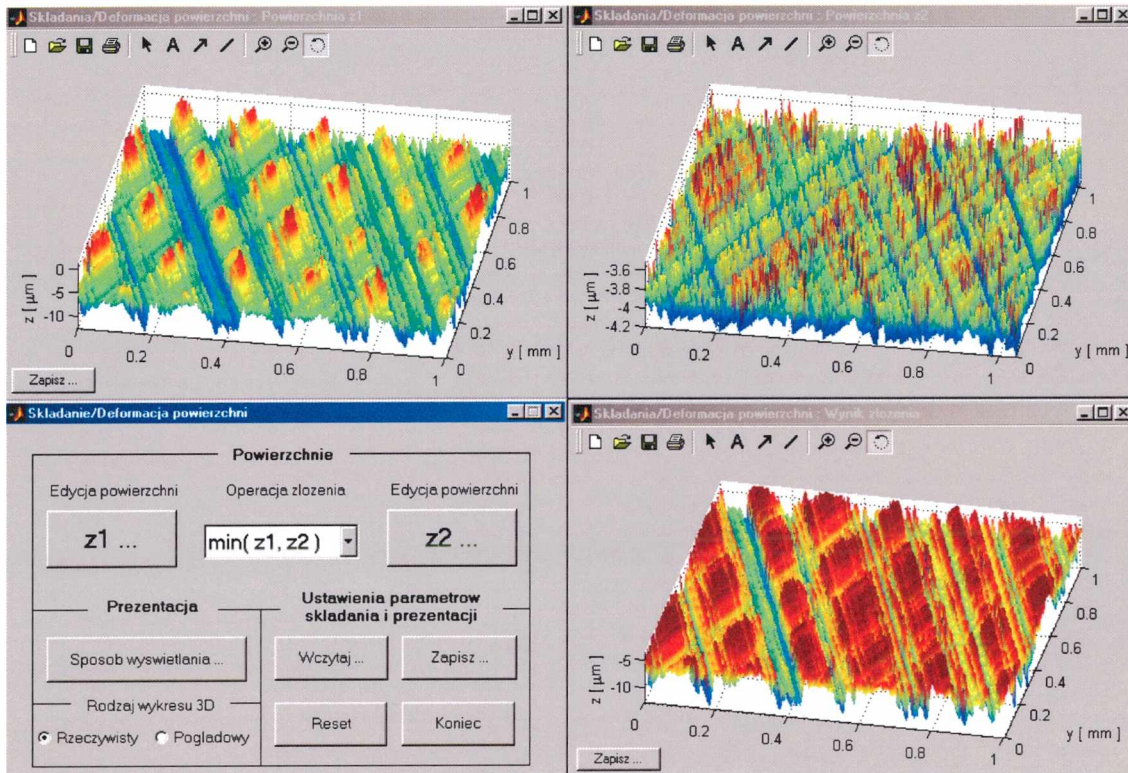


Rys.5.23. Składanie powierzchni wyjściowych symulujące gładzenie zgrubne



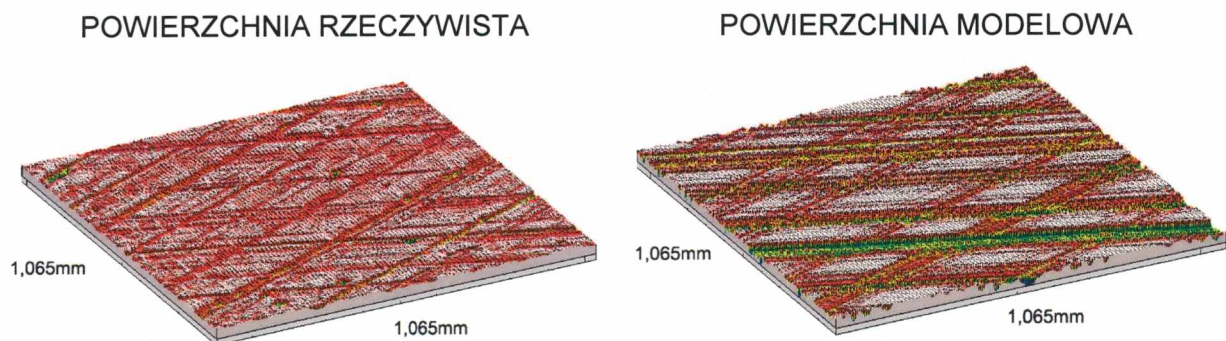
Rys.5.24. Składanie powierzchni wyjściowych symulujące gładzenie wykańczające

Od topografii powierzchni charakteryzującej obróbkę zgrubną „odcięto” (funkcja{min}), na wysokości 3,5 μm , topografię powierzchni po obróbce wykańczającej i uzyskano topografię płaskowierzchołkową „plateau” (rys.5.25).



Rys.5.25. Struktura „plateau” jako efekt nakładania się na siebie rys powstałych w dwuetapowym gładzeniu

Widok powierzchni rzeczywistej i modelowej przedstawiono graficznie na rys. 5.26, a wyniki badań parametrów chropowatości w tabeli 5.7. Powierzchnia rzeczywista została zmierzona 5 razy, a w tabeli podano wartość średnią parametrów obliczoną z 5 pomiarów.



Rys.5.26. Obrazy rzeczywistej powierzchni gładzonej „plateau” i powierzchni modelowej

Tabela 5.7. Porównanie wyników pomiarów chropowatości powierzchni gładzonych rzeczywistych i powierzchni modelowych

Parametry chropowatości	Powierzchnia rzeczywista	Powierzchnia modelowa
Sa [μm]	0,70	0,96
Sq [μm]	0,93	1,18
Sp [μm]	5,08	3,93
Sv [μm]	7,34	5,58
St [μm]	12,42	9,51
Ssk	-0,41	-0,44
Sku	5,91	3,78
Współczynnik korelacji ρ	0,98	

W przypadku modelowania powierzchni płaskowierzchołkowych po raz kolejny uzyskano wysoki stopień zgodności parametrów chropowatości opisujących powierzchnie rzeczywistą i modelową. Współczynnik korelacji był bliski jedności.

Opracowane oprogramowanie umożliwia modelowanie powierzchni o dużym stopniu podobieństwa do powierzchni rzeczywistych mimo, iż samo modelowanie nie uwzględnia mechaniki oddzielania materiału ze wszystkimi zjawiskami, jakie występują podczas kształtowania powierzchni. Oprócz podobieństwa wizualnego, badano także zgodność parametrów chropowatości opisujących te powierzchnie. Wartość krytyczną współczynnika korelacji przyjęto na poziomie 0,95. Można stwierdzić, że przedstawione parametry wysokościowe zostały odwzorowane z niewielkimi różnicami między powierzchniami rzeczywistymi a zamodelowanymi. Współczynnik korelacji między wszystkimi badanymi parametrami chropowatości wyniósł dla powierzchni: po obróbce strumieniowo-ściernej 0,99, dla powierzchni toczonych 0,98, a dla powierzchni gładzonych 0,98.

Prowadząc badania weryfikujące możliwości programu do modelowania powierzchni pokazano, że można matematycznie zamodelować niemal dowolnie skomplikowaną topografię powierzchni, z odzwierciedleniem kinematycznych i dynamicznych aspektów jej kształtowania. Wykazano, że istnieje możliwość badania cech geometrycznych dowolnych powierzchni, uzyskanych za pomocą modelowania matematycznego, bez konieczności wytwarzania ich w warunkach rzeczywistych.

Na podstawie badań weryfikujących działanie wykonanego programu *modelowanie_skr* udowodniono pierwszą i drugą tezę pomocniczą pracy.

6. KLASYFIKACJA STRUKTUR GEOMETRYCZNYCH POWIERZCHNI

W celu uporządkowania dalszych rozważań i wprowadzenia systematyki w tworzeniu modeli chropowatości powierzchni zaproponowano nowy podział struktur chropowatości według charakterystycznych cech geometrycznych na nich występujących. Struktury przestrzenne 3D zostały podzielone na 2 grupy:

- z ciągłymi śladami kształtowania (rys.6.1),
- z dyskretnymi śladami kształtowania (rys.6.2).

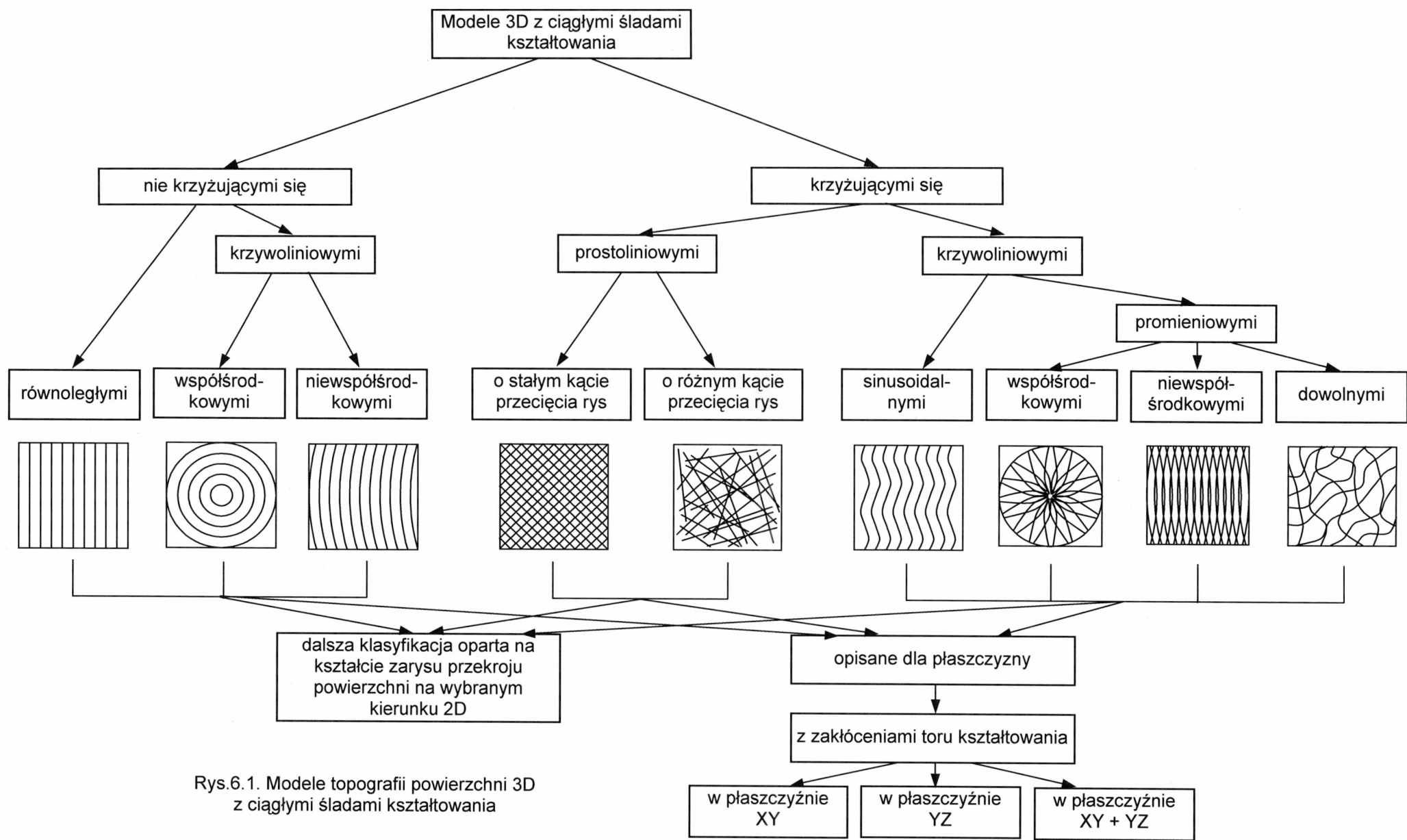
Ponieważ pewne cechy geometryczne występujące na powierzchni 3D, można w większości przypadków lepiej scharakteryzować analizując wybrany profil chropowatości 2D, dalszy podział modeli, niezależnie od tego czy ślady kształtowania są ciągłe czy dyskretne, przeprowadzono na pojedynczym charakterystycznym profilu 2D, określonym, o ile to możliwe, na kierunku prostopadłym do śladów kształtowania powierzchni.

Profile 2D podzielono na 3 grupy:

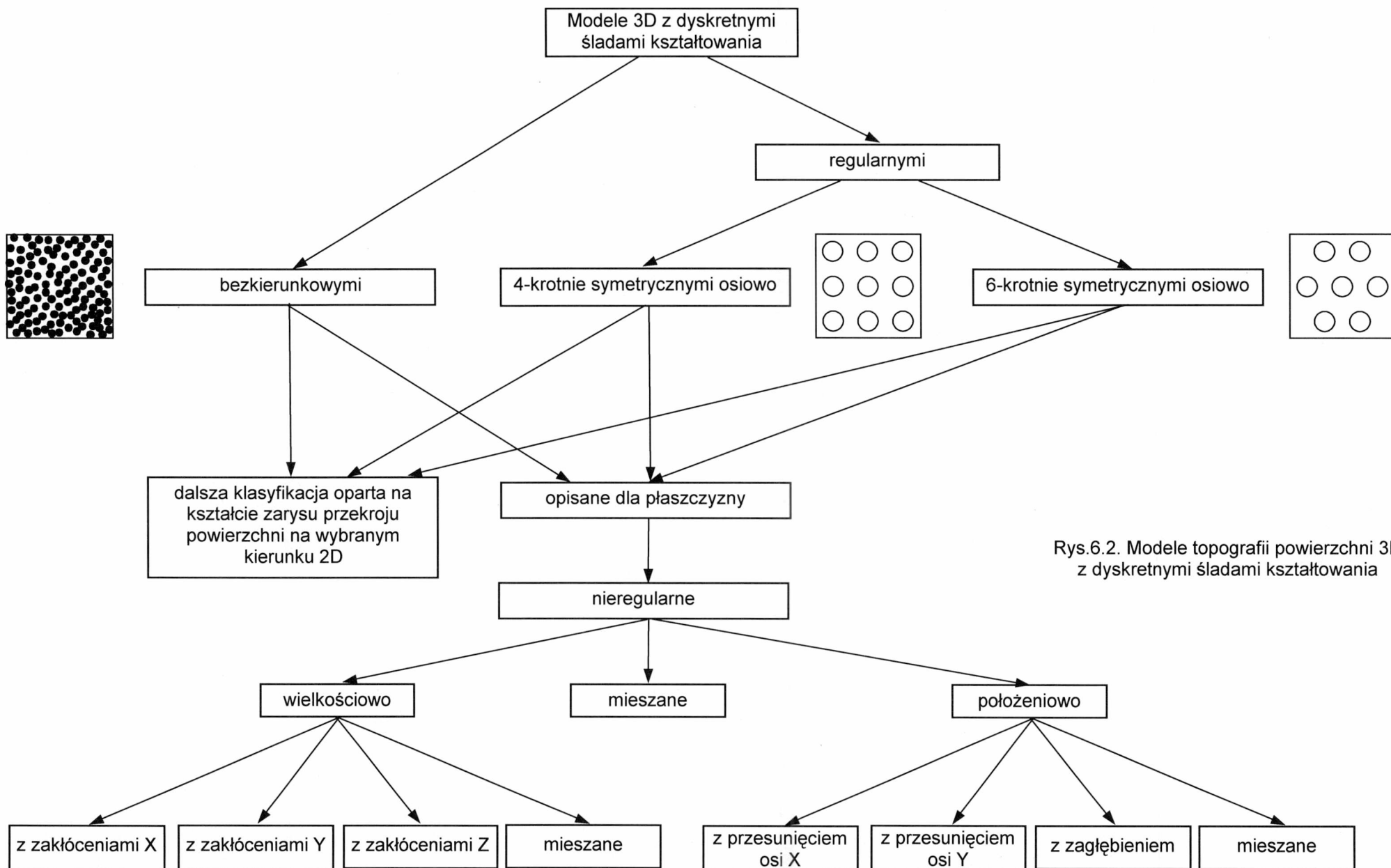
- profile o dominujących ostrych wierzchołkach (rys.6.3),
- profile o ostrych wierzchołkach i zagłębieniach (rys.6.4),
- profile o dominujących ostrych zagłębieniach np. plateau (rys.6.5).

Dominującą cechą struktur geometrycznych 3D jest kierunkowość określająca położenie śladów powstałych na powierzchni po procesie obróbki. Stosowaną dotychczas klasyfikację kierunkowości zaproponowaną w normie PN-87/M-04256 [84] znacznie rozszerzono, umiejscawiając w nowym podziale takie struktury, w których występują zakłócenia śladów kształtowania powstające podczas kształtowania ciągłego i dyskretnego. Pewna uniwersalność zaproponowanej klasyfikacji polega na połączeniu w niej dwóch, dotąd analizowanych osobno, rodzajów struktur: pojedynczego profilu chropowatości 2D oraz powierzchni 3D. Podział profili chropowatości 2D przeprowadzony został z uwzględnieniem takich cech geometrycznych, które będą miały znaczący wpływ na późniejsze właściwości eksploatacyjne badanej struktury. Przy tworzeniu podziału profili chropowatości 2D uwzględniono cechy topografii powierzchni, jakie powstają podczas tworzenia się WW w procesie technologicznym lub eksploatacyjnym.

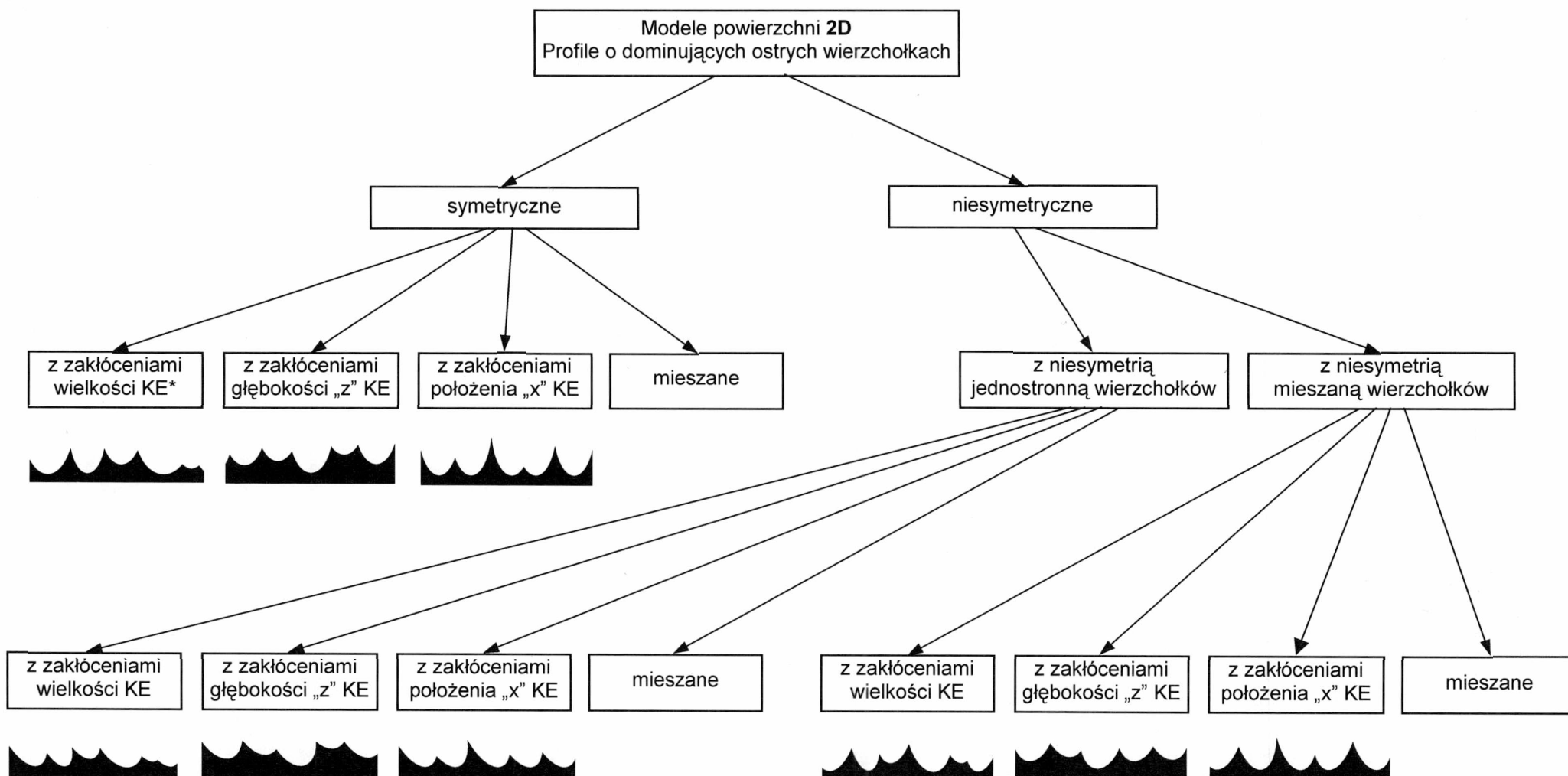
Zaproponowana klasyfikacja SGP umożliwia i ułatwia kompleksową ocenę struktur geometrycznych 3D i 2D. Możliwy jest spójny opis różnych struktur geometrycznych 3D, uwzględniający ważne cechy geometryczne, rozpoznawalne podczas analizy profilu chropowatości 2D. W zaproponowanym podziale starano się zawrzeć kompromis pomiędzy zbytnią szczegółowością i ogólnością dotychczas stosowanych klasyfikacji struktur geometrycznych powierzchni 3D i profili 2D.



Rys.6.1. Modele topografii powierzchni 3D z ciągłymi śladami kształtowania

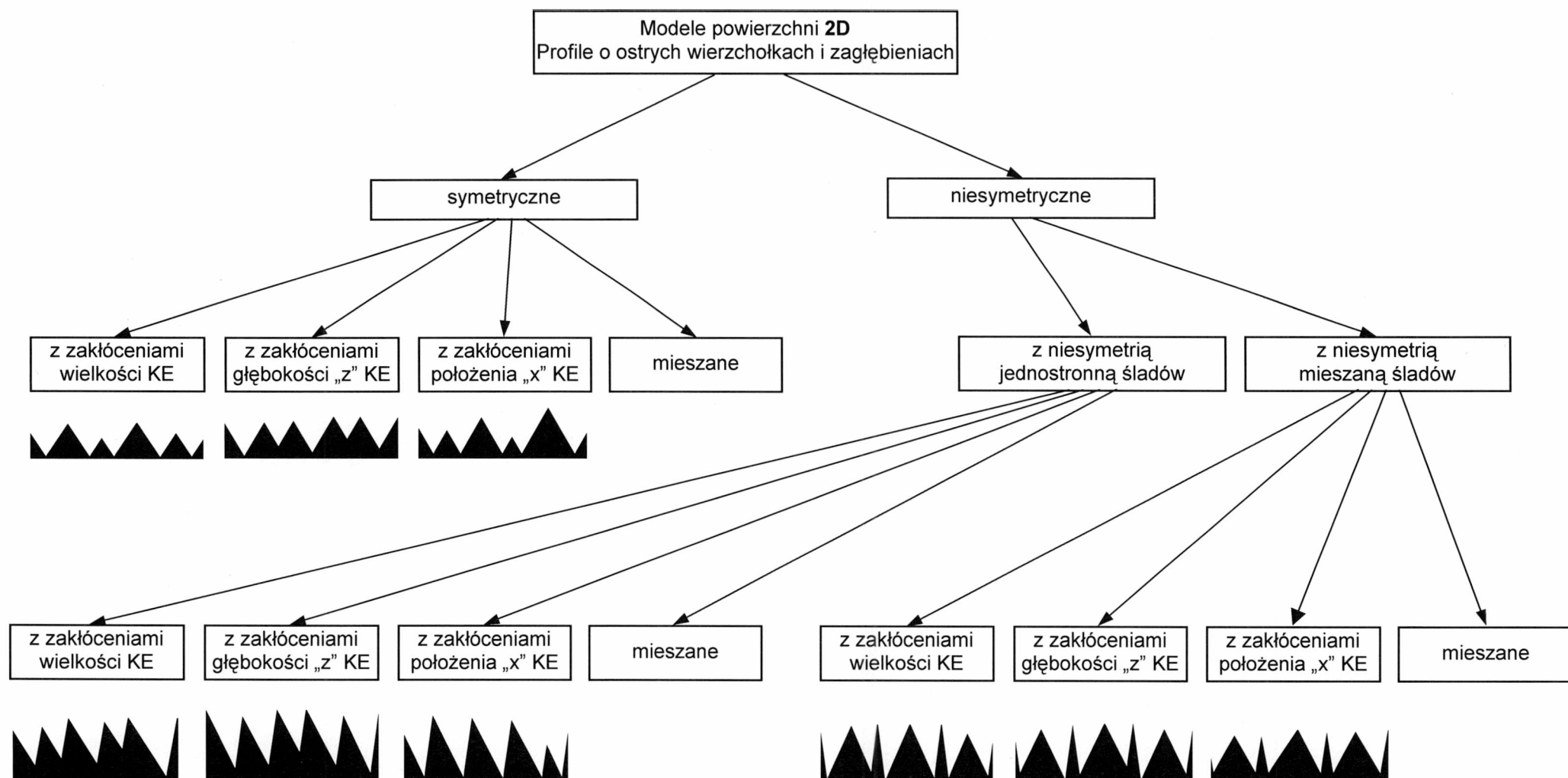


Rys.6.2. Modele topografii powierzchni 3D z dyskretnymi śladami kształtowania

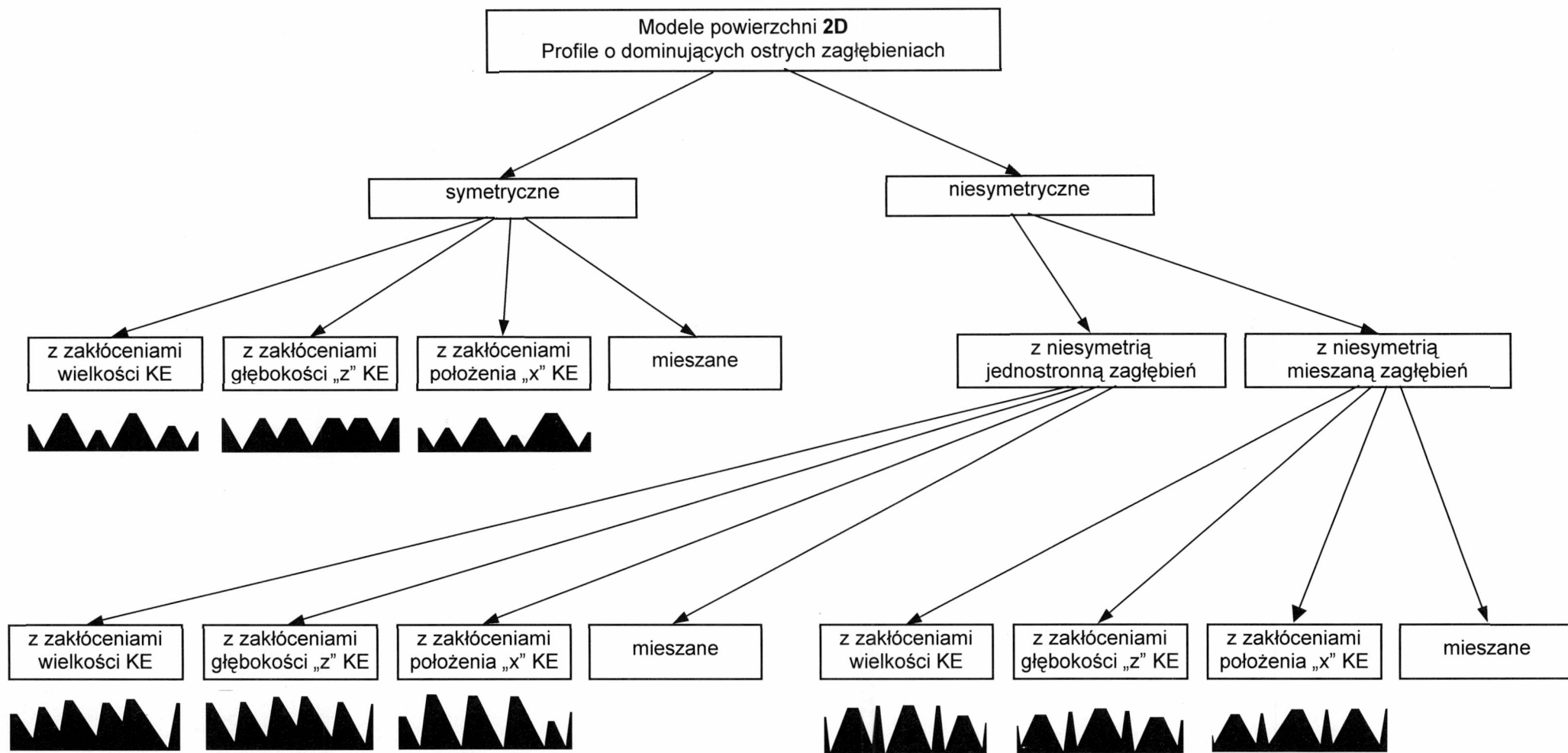


Rys.6.3. Modele chropowatości powierzchni (2D) o dominujących ostrych wierzchołkach

* - KE-Kształt Elementarny –figura bądź bryła geometryczna stanowiąca podstawowy element składowy modelowanych profili 2D czy powierzchni 3D.



Rys.6.4. Modele chropowatości powierzchni (2D) o ostrych wierzchołkach i zagłębieniach



Rys.6.5. Modele chropowości powierzchni (2D) o dominujących ostrych zagłębieniach

7. ANALIZA PRZYDATNOŚCI PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OPISU MODELI TOPOGRAFII POWIERZCHNI

7.1. METODYKA BADAWCZA

Badania przydatności parametrów chropowatości do opisu wybranych modeli SGP przeprowadzono według następującej metodyki

- wybór modelu(-i) struktur geometrycznych powierzchni,
- przyjęcie cechy charakterystycznej modelu(-i) powierzchni,
- ustalenie poziomu(-ów) zmian badanej cechy,
- zamodelowanie numeryczne przyjętych modeli topografii powierzchni,
- wygenerowanie zbiorów punktów dla wybranych modeli profili i powierzchni,
- wczytanie zbiorów punktów do oprogramowania profilografometru firmy Taylor-Hobson,
- obliczenie parametrów chropowatości,
- określenie wskaźników oceny zamodelowanych powierzchni,
- wybór parametrów najlepiej opisujących określoną, badaną cechę modelu powierzchni.

7.1.1. WSKAŹNIKI OCENY PRZYDATNOŚCI PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OPISU CECH GEOMETRYCZNYCH MODELI TOPOGRAFII POWIERZCHNI

Do oceny przydatności poszczególnych parametrów chropowatości do opisu wybranych cech geometrycznych topografii powierzchni użyto dwóch wskaźników.

Pierwszym z nich był współczynnik korelacji ρ określający zależność między dwoma zbiorami danych skalowanymi niezależnie od jednostek pomiarowych. Korelacja populacji odpowiada kowariancji dwóch zbiorów danych podzielonej przez iloczyn odchyłeń standardowych dla tych zbiorów [33], [55]:

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\delta_X \cdot \delta_Y} \quad (7.1)$$

$$\delta_X^2 = \frac{1}{n} \sum (X_j - \mu_x)^2 \quad (7.2)$$

$$\delta_Y^2 = \frac{1}{n} \sum (Y_j - \mu_y)^2 \quad (7.3)$$

Ten bezwymiarowy współczynnik może być zawarty w przedziale - $1 < \rho < 1$. Im wartość $|\rho|$ jest bliższa 1, tym zależność między cechami obu zbiorów jest silniejsza, a im bardziej zbliżona do 0, tym zależność ta jest mniejsza. Jednak trzeba sobie zdawać sprawę z faktu częstej nadinterpretacji, związanej z wyciąganiem wniosków tylko na podstawie wartości współczynnika korelacji. Uwidacznia to następujący przykład. Załóżmy, że badana jest zależność między czynnikami wejściowymi a wyjściowymi jakiegoś procesu, np.: zmiana czynnika wejściowego x charakteryzuje się zbiorami $X_1 \{1;2;3\}$ i $X_2 \{1;3;2\}$, a zmiana czynnika wyjściowego y zbiorami $Y_1 \{1001; 1002; 1003\}$ i $Y_2 \{1001; 1003; 1002\}$. Współczynniki korelacji, określone odpowiednio dla dwóch zestawów zbiorów, są w obu przypadkach takie same i wynoszą $\rho_{1x,y} = \rho_{2x,y} = 1$, mimo, że w każdym ze zbiorów X_1 i X_2 czynnik x zmienił swoją wartość o 200%, a w zbiorach Y_1 i Y_2 czynnik y zaledwie o 0,2% [4].

Dlatego też chcąc określić, które z parametrów chropowatości najlepiej opisują zmiany cechy charakterystycznej profilu zdecydowano się podczas oceny uwzględniać nie tylko współczynnik korelacji, ale także wskaźnik oceny uwzględniający porównanie zmian procentowych wartości badanej, zamodelowanej cechy profilu ze zmianami procentowymi parametrów chropowatości. Zmianę wartości badanego parametru chropowatości oznaczono symbolem t i wyrażono w procentach. Opisuje go wzór:

$$t = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{sr}} \cdot 100\% \quad (7.4)$$

gdzie: $R_{\max}$ – wartość maksymalna badanego parametru chropowatości, $R_{\min}$ – wartość minimalna badanego parametru chropowatości, R_{sr} – średnia wartość badanych parametrów chropowatości.

Kwalifikując dany parametr chropowatości, jako mogący być przydatnym do opisu określonej cechy modelu chropowatości, brano pod uwagę to, czy współczynnik korelacji ρ pomiędzy poziomami badanej cechy modelowej, a odpowiadającymi im wartościami ocenianych parametrów chropowatości jest bliski jedności ($|\rho| > 0,95$) oraz jednocześnie czy przyrost wartości badanego parametru chropowatości t jest większy niż arbitralnie przyjęta wartość 30%.

Drugim kryterium zakwalifikowania parametru jako mogącego być przydatnym do opisu określonej cechy modelu chropowatości, była duża zmiana procentowa badanego parametru chropowatości ($>100\%$), nawet jeśli współczynnik korelacji był stosunkowo niewielki. W tym drugim przypadku konieczna jest dalsza, pogłębiona analiza i badania oddziaływań wyższego rzędu.

Przydatność parametru do opisu zmiany cechy charakterystycznej profilu oznaczono w tabelach symbolami:

- „++” – bardzo dobrze opisuje zamodelowane zmiany,
- „+” – dobrze opisuje zamodelowane zmiany,
- „-” – nie nadaje się do opisu zamodelowanych zmian.

7.2. WSKAŹNIKI I PARAMETRY ZASTOSOWANE DO OPISU CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI

7.2.1. PARAMETRY CHROPOWATOŚCI PROFILU 2D

Charakteryzowanie chropowatości powierzchni nabiera obecnie dużego znaczenia w wielu dziedzinach związanych z konstrukcją, technologią i eksploatacją maszyn i urządzeń. Metodologia analizy chropowatości powierzchni została opracowana przed około 50 - laty. Od tego czasu, z biegiem lat, zaproponowano użytkownikom prawie 300 różnych parametrów chropowatości i falistości [106]. W latach 80-tych ubiegłego stulecia nazwano trend do tworzenia coraz to nowych parametrów chropowatości „wysypem parametrów”, czy „gorączką parametrową” [30], [94]. Spowodowało to dyskusje o sensie stosowania wielu z nich w praktyce przemysłowej. W roku 1998 firma Taylor-Hobson, starając się uporządkować sytuację z ciągle narastającą liczbą parametrów, opublikowała listę 24 parametrów najczęściej używanych w przemyśle [34]. W publikacji tej parametry zostały podzielone na 5 grup:

- wysokościowe,
- związane z rozkładem rzędnych i kształtem profilu,
- związane z odstępem nierówności,
- związane z pochyleniem powierzchni,
- inne np. motyw (R , R_x , AR).

Podstawowe terminy i pojęcia dotyczące chropowatości powierzchni są przedmiotem norm PN-EN ISO 4287:1999 [85] i PN-ISO-3274:1997 [86] oraz artykułów publikowanych w czasopiśmie [1].

Zgodnie z normą PN-EN ISO 4287:1999 parametry opisujące fizyczne zależności struktury geometrycznej powierzchni dzielą się na trzy grupy:

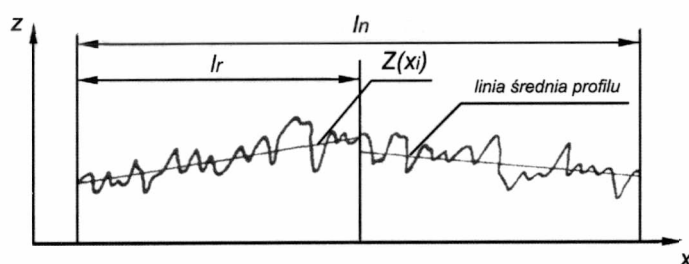
- parametry pionowe (amplitudowe) chropowatości, określane w kierunku prostopadłym do linii średniej profilu, w tym wysokości wzniesień i głębokości wgłębień oraz wartości średnie rzędnych profilu,
- parametry poziome (odległościowe) chropowatości, określane w kierunku równoległym do linii średniej profilu,
- parametry mieszane.

W najnowszym dostępnym oprogramowaniu pomiarowym firma Taylor – Hobson zaproponowała podział parametrów chropowatości 2D na 4 grupy:

- amplitudowe: Ra , Rq , Rp , Rv , Rz , Rt , Rsk , Rku , Rc , $Rz(JIS)$,
- hybrydowe: $R\Delta q$, $R\lambda q$, $R\Delta a$, RVo ,
- długościowe: RSm , $RHSC$, RPc , RLo , RS ,
- odczytane z krzywej udziału nośnego: $R\delta c$, Rmr , $Rmr(C)$.

Chropowatość powierzchni rozpatruje się na profilu powierzchni w przedziałach umownie określonych przez odcinek elementarny l_r , który określany jest jako długość w kierunku osi x w celu identyfikacji nierówności charakteryzujących oceniany profil. Bardzo ważnym pojęciem, niezbędnym do pomiarów i analizy chropowatości powierzchni, jest także odcinek pomiarowy l_n . Jest to długość w kierunku osi x stosowana do oceny profilu. Odcinek pomiarowy może zawierać jeden lub więcej odcinków elementarnych.

Linia średnia profilu chropowatości jest również niezbędną wielkością do parametryzacji struktury geometrycznej powierzchni. Definiuje się ją jako linię odpowiadającą składowym długofalowym profilu (rys.7.1).

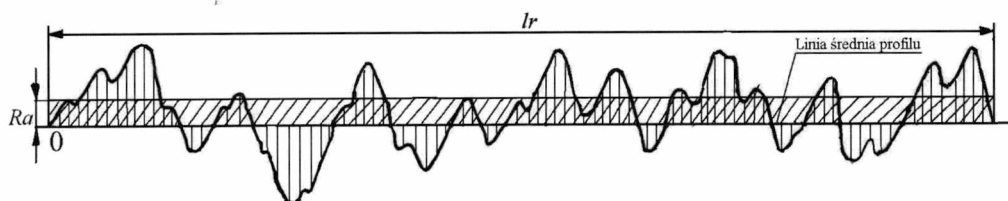


Rys.7.1. Graficzne przedstawienie linii średniej chropowatości

7.2.1.1. PARAMETRY AMPLITUDOWE

Ra - średnia arytmetyczna bezwzględnych wartości rzędnych $Z(x)$ wewnątrz odcinka elementarnego l_r (rys.7.2), której wartość oblicza się ze wzoru:

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (7.5)$$



Rys.7.2. Graficzne przedstawienie średniej arytmetycznej rzędnych profilu Ra

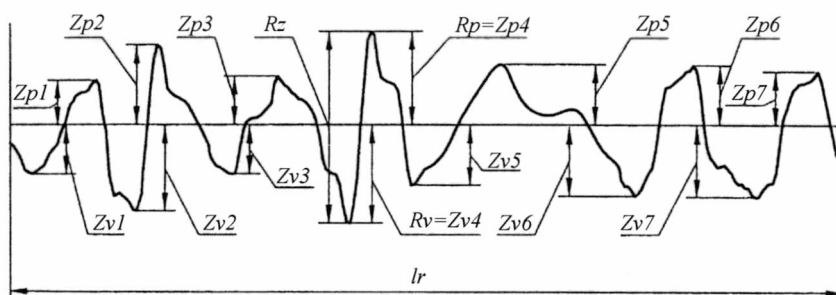
Rq - średnia kwadratowa rzędnych $Z(x)$ profilu wewnątrz odcinka elementarnego. Wartość tej średniej określona jest wzorem:

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^2(x) dx} \quad (7.6)$$

Rp - wysokość najwyższego wzniesienia profilu, którą definiuje się jako wysokość najwyższego wzniesienia profilu Zp wewnątrz odcinka elementarnego lr .

Rv - głębokość najniższego wgłębienia profilu chropowatości to głębokość najniższego wgłębienia profilu Zv wewnątrz odcinka elementarnego lr .

Rz - największa wysokość profilu chropowatości. Jest to suma wysokości najwyższego wzniesienia Zp i głębokości najniższego wgłębienia profilu chropowatości Zv wewnątrz odcinka elementarnego lr (rys.7.3).



Rys.7.3. Graficzne przedstawienie wysokości nierówności profilu chropowatości Rp , Rv , Rz

Rt - całkowita wysokość profilu chropowatości, którą określa się jako sumę wysokości najwyższego wzniesienia Zp i największej głębokości wgłębienia Zv określaną wewnątrz odcinka pomiarowego ln .

Rsk - współczynnik asymetrii profilu, iloraz średniej wartości trzeciej potęgi rzędnych $Z(x)$ i trzeciej potęgi parametru Rq określony wewnątrz odcinka elementarnego lr . Wartość tego parametru oblicza się ze wzoru:

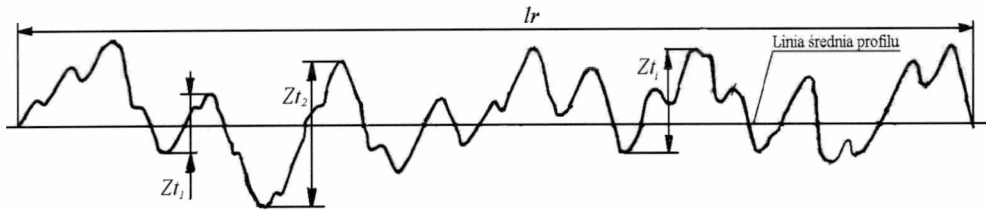
$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^3(x) dx \right] \quad (7.7)$$

Rku - współczynnik nachylenia profilu, iloraz średniej wartości czwartej potęgi rzędnych $Z(x)$ i czwartej potęgi parametru Rq . Parametr ten również jest określony wewnątrz odcinka elementarnego lr , a jego wartość definiuje wzór:

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^4(x)| dx \right] \quad (7.8)$$

Rc - wysokość elementów profilu chropowatości, czyli średnia wartość wysokości elementów profilu Zt wewnątrz odcinka elementarnego lr (rys.7.4). Parametr ten jest zdefiniowany wzorem:

$$Rc = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Zt_i \quad (7.9)$$



Rys.7.4. Graficzne przedstawienie maksymalnej wysokości wzniesienia profilu chropowatości Rc

$Rz(JIS)$ - wysokość chropowatości według 10 punktów, średnia arytmetyczna wartość bezwzględnych wysokości pięciu najwyższych wzniesień profilu chropowatości i pięciu najniższych wgłębień profilu chropowatości na długości odcinka elementarnego lr . Parametr ten obliczany jest ze wzoru:

$$Rz(JIS) = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^{i=5} Zpi - \sum_{i=1}^{i=5} Zvi \right) \quad (7.10)$$

7.2.1.2. PARAMETRY HYBRYDOWE

$R\Delta q$ - średni kwadratowy wznios profilu chropowatości, wartość średniej kwadratowej miejscowych wzniosów profilu dZ/dX wewnątrz odcinka elementarnego lr . Parametr ten oblicza się z zależności:

$$R\Delta q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} \left[\frac{dZ}{dX} \right]^2 dx} \quad (7.11)$$

$R\lambda q$ - średnia kwadratowa długość fali profilu chropowatości, 2π krotny stosunek średniego kwadratowego odchylenia Rq do średniego kwadratowego pochylenia profilu $R\Delta q$. Obliczana z zależności:

$$R\lambda q \approx 2\pi \frac{Rq}{R\Delta q} \quad (7.12)$$

$R\Delta a$ - średnie arytmetyczne pochylenie profilu chropowatości, średnia arytmetyczna wartość zmiany współrzędnych profilu chropowatości w przedziale odcinka elementarnego l_r . Obliczana z zależności:

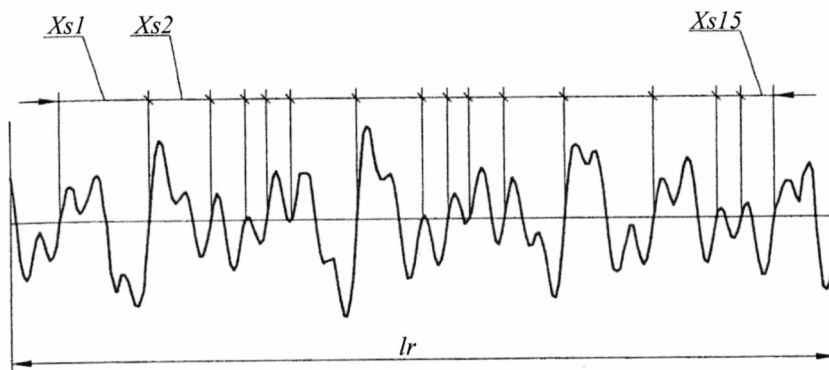
$$R\Delta a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z'(x)| dx \quad (7.13)$$

RV_o - objętość olejowa - zdolność powierzchni do utrzymania oleju przez głębokie doliny. Wyraża ona objętość wgłębień poniżej rdzenia chropowatości przypadającą na jednostkę powierzchni.

7.2.1.3. PARAMETRY DŁUGOŚCIOWE

RS_m - średnia szerokość rowków elementów profilu X_s wewnątrz odcinka elementarnego l_r (rys.7.5). Wartość RS_m oblicza się ze wzoru:

$$RS_m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{s_i} \quad (7.14)$$



Rys.7.5. Graficzne przedstawienie średniej szerokości rowków elementów profilu RS_m

RHSC - liczba miejscowych wzniesień profilu przypadających na odcinek elementarny l_r , określona względem linii przesuniętej równolegle do linii średniej o wartości c .

RPc - liczba miejscowych wzniesień profilu, które znajdują się ponad pasmem o szerokości c symetrycznym w stosunku do linii średniej. Jest to liczba wzniesień chropowatości na centymetr lub cal.

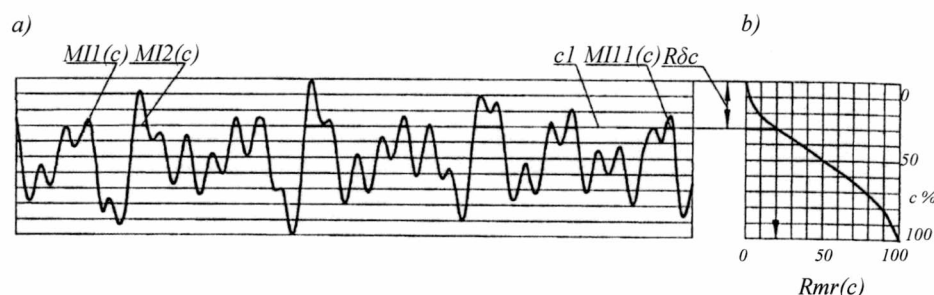
RLo - długość rozwinięta profilu. Określa rzeczywistą długość profilu chropowatości na długości odcinka pomiarowego l_n . Opisany jest wzorem:

$$RLo = \int_0^{l_n} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (7.15)$$

RS - średni odstęp miejscowych wzniesień profilu S , średnia wartość z odstępów miejscowych wzniesień profilu chropowatości na długości odcinka elementarnego l_r .

7.2.1.4. PARAMETRY ODCZYTANE Z KRZYWEJ UDZIAŁU MATERIAŁOWEGO

Krzywa udziału materiałowego - krzywa przedstawiająca udział materiałowy jako funkcję wysokości cięcia [105] (rys.7.6). Zgodnie ze starą nomenklaturą nazywana jest krzywą nośności lub Abbott'a Firestone'a. Jest ona graficzną reprezentacją przebiegu wartości współczynnika udziału materiału profilu $Rmr(C)$ w zależności od poziomów przecięcia tego profilu.



Rys.7.6. Profil chropowatości oraz krzywa udziału materiałowego: a) profil ze składnikami długości materiałowej na poziomie cięcia; b) krzywa udziału materiałowego

Rdc - różnica między dwoma poziomami cięcia, różnica wartości poziomu cięcia między dwoma zadanymi poziomami udziału materiałowego.

Rmr - względny udział materiałowy, wartość udziału materiałowego profilu na poziomie cięcia *c* o wysokości cięcia *C0* i odstępzie *Rδc*.

Rmr(C) - udział materiałowy profilu, iloraz długości materiałowych elementów profilu *MI(c)* na zadanym poziomie *c* wewnątrz odcinka elementarnego *lr*. Obliczany jest z zależności:

$$Rmr(c) = \frac{MI(c)}{ln} \cdot 100\% \quad (7.16)$$

7.2.2. PARAMETRY CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI 3D

Badania prowadzone w ostatnim czasie wykazują, że nie można dokładnie scharakteryzować powierzchni dokonując tego tylko w układzie płaskim (2D) [19], [22], [23], [76], [106]. Charakterystyka taka może być bowiem obciążona znacznym błędem wynikającym z założenia, że badana powierzchnia jest strukturą nieizotropową. Wyznaczone wartości parametrów w układzie 2D tylko pośrednio mogą być wskaźnikami oceny nierówności powierzchni. Szczególnie uważnie podchodzić należy do oceny anizotropii powierzchni, oceny największej wysokości nierówności powierzchni, promienia zaokrąglenia wierzchołka i wgłębienia oraz oceny wielkości pola powierzchni styku w czasie przyszłej współpracy badanych powierzchni [14]. Wyznaczone za pomocą pomiaru 2D profilogramy nie zawierają zwykle informacji o punktach ekstremalnych nierówności powierzchni, stąd parametry opisujące te wielkości mogą być, przy zastosowaniu metody 2D, obarczone dużym błędem [36], [73], [75], [104], [107].

Rozwój technologii przyczynił się do wprowadzenia nowoczesnej, bardziej kompleksowej metody oceny nierówności powierzchni – czyli stereometrycznej analizy powierzchni. Pomimo licznych prób wprowadzania innych technik skanowania powierzchni (metoda holograficzna, mikroskopia skaningowa) najczęściej stosowaną do tej pory jest trójwymiarowa profilometryczna metoda pomiaru mikrostereometrii powierzchni. Jest ona rozwinięciem metody dwuwymiarowej, a więc wszystkie wady i zalety metody stykowej skanowania profilu zostały przeniesione na stykowe skanowanie powierzchni [52].

Ponieważ konstrukcja konwencjonalnych przyrządów stykowych (profilografometrów) umożliwia ruch igły diamentowej po linii prostej, to w celu pomiarów 3D wprowadzono technikę skanowania polegającą na wielokrotnym, równoległym przesuwaniu igły po mierzonej powierzchni. W celu uzyskania przesuwu poprzecznego stosuje się np. stół z ruchem poprzecznym, napędzany silnikiem krokowym.

Trójwymiarowa, stereometryczna analiza mikrogeometrii powierzchni, nazywana w skrócie 3D, stanowi źródło informacji w badaniach technologicznych, tribologicznych

i w mechanice kontaktu powierzchni chropowatych. Umożliwia ona przeprowadzenie badań wpływu rzeczywistego kształtu przestrzennego mikrogeometrii powierzchni na właściwości użytkowe wyrobów. Pozwala bowiem na dokonywanie oceny mikrostereometrii wierzchołków nierówności oraz tych cech kontaktowych powierzchni, których nie można oceniać w oparciu o dwuwymiarowe pomiary chropowatości [53], [119], [120].

Parametry oceny SGP w ujęciu trójwymiarowym (3D) po części zostały utworzone przez analogię do pomiarów w ujęciu dwuwymiarowym (2D). Dla odróżnienia od parametrów określających cechy geometryczne pojedynczego profilu oznacza się je literą „S”. Parametry 3D zostały podzielone na następujące grupy:

- a) parametry amplitudowe: Sa , Sq , St , Sp , Sv , Sz , Ssk , Sku ,
- b) parametry przestrzenne: SPc , Sds , Str , Sal , Std , Sfd ,
- c) parametry powierzchniowe i objętościowe: STp , $SHTp$, $Smmr$, $Smvr$,
- d) parametry hybrydowe: $S\Delta q$, Ssc , Sdr ,
- e) parametry funkcjonalne: Sbi , Sci , Svi .

7.2.2.1. PARAMETRY AMPLITUDOWE

Średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości Sa , podobnie jak Ra , jest wartością średnią arytmetyczną odchylenia chropowatości powierzchni reszkowej w obrębie obszaru próbkowania i jest obliczane z zależności:

$$Sa = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \eta(x_i, y_j) \quad (7.17)$$

Do tej grupy parametrów należy również zaliczyć *średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni* Sq , które jest określone jako wartość średnia kwadratowego odchylenia chropowatości powierzchni w obszarze próbkowania. Parametr ten definiuje wzór:

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \eta^2(x_i, y_j)} \quad (7.18)$$

Do grupy parametrów amplitudowych zalicza się także *wysokość nierówności* St , która jest odległością między najwyższym i najniższym punktem powierzchni reszkowej w obszarze pomiarowym, oraz *maksymalna wysokość wzniesienia powierzchni* Sp i *maksymalna głębokość wgłębienia powierzchni* Sv .

Kolejnym parametrem z tej grupy jest S_z , czyli *dziesięciopunktowa wysokość nierówności powierzchni*, która jest średnią wartością bezwzględnych wysokości pięciu najwyższych wzniesień i pięciu najniższych wgłębień w obrębie obszaru próbkowania. Oblicza się ją z zależności:

$$S_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |n_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |n_{vi}|}{5} \quad (7.19)$$

Parametry amplitudowe uzupełniają także S_{sk} , czyli *współczynnik asymetrii* i S_{ku} - *współczynnik skupienia* wyrażone wzorami:

$$S_{sk} = \frac{1}{MNSq^3} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \eta^3(x_i, y_i) \quad (7.20)$$

$$S_{ku} = \frac{1}{MNSq^4} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \eta^4(x_i, y_i) \quad (7.21)$$

7.2.2.2. PARAMETRY PRZESTRZENNE

Pierwszym parametrem tej grupy jest SPc – *gęstość wierzchołków pomiędzy dwoma poziomami c_1 i c_2* (jest on utworzony przez analogię do parametru RPc stosowanego w pomiarach pojedynczego profilu 2D).

Do parametrów przestrzennych zalicza się również *gęstość wierzchołków nierówności powierzchni* S_{ds} . Jest to liczba wierzchołków jednostkowego obszaru próbkowania. Obliczana jest z zależności:

$$S_{ds} = \frac{\text{Liczba wierzchołków}}{(M-1)(N-1) \cdot \Delta x \cdot \Delta y} \quad (7.22)$$

Kolejnym parametrem przestrzennym jest *długość odcinka najszybszego zanikania funkcji autokorelacji* S_{al} , która została zdefiniowana jako najmniejsza długość pozioma, w której znormalizowana powierzchniowa funkcja autokorelacji zanika do τ (domyślnie 0,2) w dowolnym możliwym kierunku. Parametr ten jest określony zależnością:

$$Sal = \min\left(\sqrt{\tau_p^2 + \tau_q^2}\right), \quad \bar{R}(\tau_p, \tau_q) \leq \tau \quad (7.23)$$

Wskaźnik tekstury powierzchni *Str* jest także parametrem z tej grupy. Jest to miara tekstury powierzchni określona wzorem (7.24). Wyraża on miarę długich grzbietów i jest zależnością najkrótszego do najdłuższego odcinka zanikania funkcji korelacji.

$$Str = \frac{Sal}{l} \quad (7.24)$$

gdzie: l – odległość na której $R(\tau_p, \tau_q)$ ma najmniejszy zanik do τ w obrębie obszaru próbkowania.

Parametrem przestrzennym jest również *kierunek tekstury powierzchni Std*, który jest miarą kierunku tekstury liniowej względem współrzędnej y (7.25). Jest ona określana z kąta β , przy którym występuje maksymalna wartość dwuwymiarowej widmowej gęstości mocy.

$$Std = \begin{cases} -\beta, & \beta \leq \frac{\pi}{2} \\ \pi - \beta, & \frac{\pi}{2} < \beta < \pi \end{cases} \quad (7.25)$$

Do parametrów przestrzennych zaliczamy także *wymiar fraktalny lub pojemnościowy Sfd* opisany wzorem:

$$Sfd = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\lg N(\varepsilon)}{\lg\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)} \quad (7.26)$$

7.2.2.3. PARAMETRY POWIERZCHNIOWE I OBJĘTOŚCIOWE

Do parametrów powierzchniowych i objętościowych należy *udział nośny na zadanej wysokości STp*. Przedstawia on powierzchnię nośną w przekroju równoległym na zadanej odległości od zdefiniowanego punktu odniesienia.

Wysokość obszaru nośności SHTp to kolejny parametr z tej grupy, który określa się jako odstęp między dwoma równoległymi przekrojami na zadanych poziomach od największego szczytu SGP w obrębie obszaru próbkowania.

Do parametrów powierzchniowych i objętościowych należy również *średnia objętość materiału Smmr* oraz *średnia objętość pustek Smvr*.

7.2.2.4. PARAMETRY HYBRYDOWE

Parametry hybrydowe to kolejna grupa parametrów powierzchniowych. Zalicza się do niej *średnie kwadratowe nachylenie nierówności powierzchni SΔq*, które również jest wyznaczane w obszarze próbkowania. Wyznacza się ją z zależności:

$$S\Delta q = \sqrt{\frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \left[\left(\frac{\eta(x_i, y_j) - \eta(x_{i-1}, y_j)}{\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{\eta(x_i, y_j) - \eta(x_i, y_{j-1})}{\Delta y} \right)^2 \right]} \quad (7.27)$$

Parametrem hybrydowym jest również *średnia arytmetyczna krzywizn wierzchołków nierówności powierzchni Ssc*. Podobnie jak poprzedni parametr, również Ssc wyznacza się w obrębie obszaru próbkowania:

$$S_{sc} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{\eta(x_{p+1}, y_q) + \eta(x_{p-1}, y_q) - 2\eta(x_p, y_q)}{\Delta x^2} + \frac{\eta(x_p, y_{q+1}) + \eta(x_p, y_{q-1}) - 2\eta(x_p, y_q)}{\Delta y^2} \right) \quad (7.28)$$

Rozwinięcie powierzchni Sdr jest ostatnim, z omawianych, parametrem hybrydowym. Oblicza się go jako stosunek rozwiniętej powierzchni resztkowej do powierzchni próbkowania [75]:

$$S_{dr} = \frac{\sum_{j=1}^{N-1} \sum_{i=1}^{M-1} A_{ij} - (M-1)(N-1)\Delta x \cdot \Delta y}{(M-1)(N-1)\Delta x \cdot \Delta y} \cdot 100\% \quad (7.29)$$

gdzie: A_{ij} ($i=1, 2, \dots, M-1; j=1, 2, \dots, N-1$) – obszar najmniejszego czworoboku przy wartości (x_i, y_j) .

7.2.2.5. PARAMETRY FUNKCJONALNE

Wskaźnik *powierzchni nośnej Sbi* jest parametrem zaliczanym do grupy funkcjonalnych. Jest to stosunek wartości średniego kwadratowego odchylenia chropowatości powierzchni (RMS) do wysokości nierówności powierzchni przy wartości c_1 powierzchni nośnej:

$$Sbi = \frac{Sq}{\eta_{c1}} = \frac{1}{h_{c1}} \quad (7.30)$$

gdzie: η_{c1} i h_{c1} oznaczają odpowiednio wysokość nierówności powierzchni oraz znormalizowaną wysokość nierówności powierzchni przy wartości $c1$ powierzchni nośnej. Wartość domyślna $c1$ wynosi 5 %.

Parametrem funkcjonalnym jest także *wskaźnik zatrzymania cieczy przez rdzeń Sci*. Jest on stosunkiem objętości pustek jednostkowego obszaru próbkowania, zawartego między c_1 i c_2 powierzchni nośnej, do średniego kwadratowego odchylenia chropowatości powierzchni:

$$Sci = \left(\frac{V_v(h_{c1}) - V_v(h_{c2})}{(M-1)(N-1)\Delta x \cdot \Delta y} \right) / Sq \quad (7.31)$$

gdzie: h_{c2} – wysokość nierówności powierzchni przy wartości $c2$ powierzchni nośnej. Wartość domyślna $c2$ wynosi 80 %.

Ostatnim parametrem należącym do tej grupy jest *wskaźnik zatrzymania cieczy przez wgłębienia Svi*. Jest to stosunek objętości pustek jednostkowego obszaru próbkowania, zawartego poniżej c_2 powierzchni nośnej:

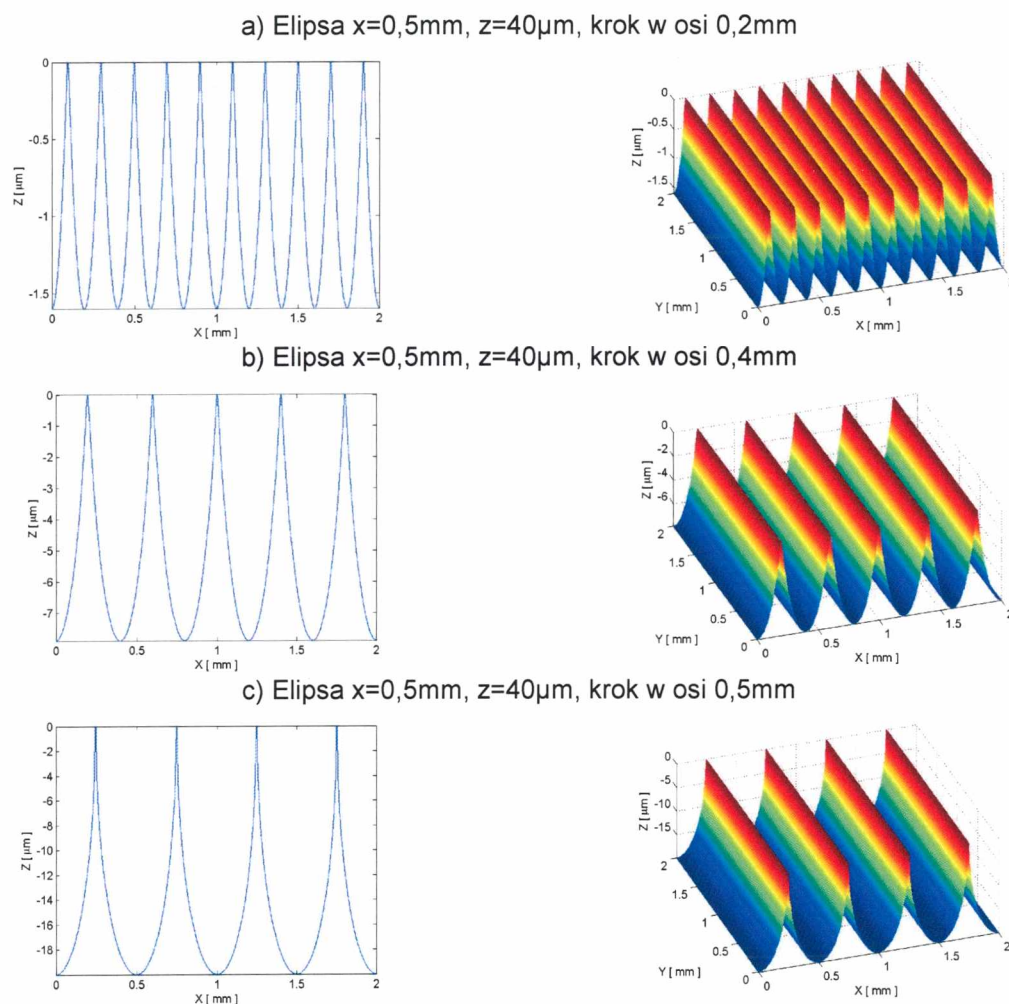
$$Svi = \left(\frac{V_v(h_{c2})}{(M-1)(N-1)\Delta x \cdot \Delta y} \right) / Sq \quad (7.32)$$

Do opisu zmian cech modelowych przyjęto możliwie jak najszersze spektrum parametrów chropowatości. Zrezygnowano jedynie z dwóch grup parametrów: krzywej nośności np. Rk , Rpk , Rvk , Sk , Spk , Svk (jako stworzonych celowo do opisu powierzchni o strukturze płaskowierzchołkowej np. tulei cylindrów silników spalinowych) oraz parametrów z grupy motif (francuska metoda pomiaru chropowatości) jako marginalnych, i nie stosowanych, bądź stosowanych bardzo rzadko w polskiej praktyce przemysłowej.

7.3. MODELE POWIERZCHNI Z CIĄGŁYMI ŚLADAMI KSZTAŁTOWANIA, NIE KRZYŻUJĄCYMI SIĘ, RÓWNOLEGŁYMI

7.3.1. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ ZMIENNĄ WIELKOŚCIĄ KROKU KE WZDŁUŻ OSI X

Do badań wybrano powierzchnię anizotropową, okresową, z różną wielkością kroku KE wzdłuż osi x. Profil chropowatości był modelowany poprzez przesunięcie, z zadanyim krokiem, KE w postaci elipsy o osiach: $x=0,5\text{mm}$ i $z=40\mu\text{m}$. Krok przesunięcia KE wzdłuż osi x przyjęto na trzech poziomach: 0,2mm; 0,4mm; 0,5mm. Powierzchnia była modelowana poprzez „przeciągnięcie” profilu chropowatości wzdłuż osi y. Obrazy zamodelowanych profili i powierzchni pokazano na rys.7.7.



Rys.7.7. Widok profili i powierzchni zamodelowanych z różną wielkością kroku wzdłuż osi x:
a) 0,2mm, b) 0,4mm, c) 0,5mm

Obliczone parametry chropowatości 2D i 3D oraz wskaźniki oceny tych parametrów zamieszczono w tabelach 7.1 i 7.2.

Tabela.7.1. Wpływ wielkości kroku KE wzdłuż osi x na parametry chropowatości 2D

Parametry	Poziomy zmian kroku KE wzdłuż osi x			ρ	t [%]	Przydat- ność
	0.2μm	0.4μm	0.5μm			
Parametry chropowatości 2D						
Parametry amplitudowe						
Ra [μm]	0.4306	1.9778	3.8017	0.97	162.85	++
Rq [μm]	0.5011	2.3360	4.7553	0.96	168.10	++
Rp [μm]	1.0348	5.4114	15.1890	0.92	196.27	+
Rv [μm]	0.5604	2.5265	4.4926	0.98	155.64	++
Rt [μm]	1.5952	7.9379	19.6817	0.94	185.73	+
Rsk	0.6543	0.8055	1.2843	0.89	68.88	-
Rku	2.1364	2.4393	4.0054	0.85	65.34	-
Rz [μm]	1.5952	7.9379	19.6817	0.94	185.73	+
Rc [μm]	1.5836	7.8592	19.6356	0.93	186.24	+
Rz(JIS) [μm]	1.5918	7.8770	19.6525	1.00	132.76	+
Parametry hybrydowe						
RΔq [°]	1.084	2.796	7.938	0.89	173.99	-
RΔa [°]	0.944	2.331	4.772	0.94	142.71	+
RVo [mm ³ /cm ²]	0.0140	0.0581	0.0937	0.99	144.21	++
Rλq [μm]	166.38	300.72	215.67	0.53	59.03	-
Parametry długościowe						
RSm [μm]	192.50	373.00	457.50	1.00	77.71	+
RS [μm]	200.00	400.00	500.00	1.00	81.82	+
RPc [wierz/cm]	45.5	20.2	15.2	-0.98	112.36	++
RLo [mm]	1.9803	1.9823	1.9973	0.82	0.86	+
RHSC [wierz]	9	4	3	-0.98	112.50	++
Parametry odczytywane z krzywej udziału nośnego						
Rδc [μm]	1.5952	7.9379	19.6817	0.94	185.73	+
Rmr [%]	50.00	50.00	50.00	0.00	0.00	-
Rmr(C) [%]	42.39	40.85	37.97	-0.93	10.94	-

Tabela.7.2. Wpływ wielkości kroku KE wzdłuż osi x na parametry chropowatości 3D

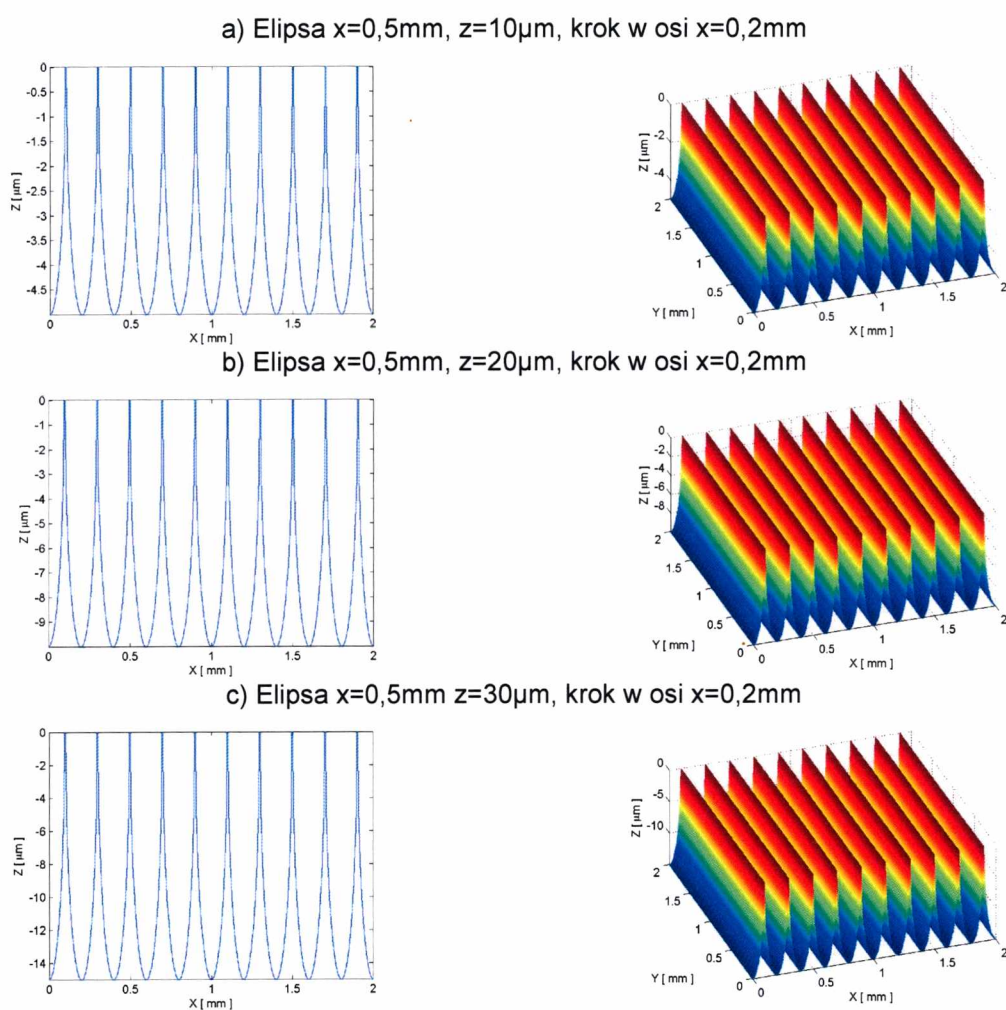
Parametry	Poziomy zmian kroku KE wzdłuż osi x			ρ	t [%]	Przydat- ność
	0.2μm	0.4μm	0.5μm			
Parametry chropowatości 3D						
Parametry amplitudowe						
Sa [μm]	0.432	1.98	3.8	0.97	162.65	++
Sq [μm]	0.502	2.34	4.76	0.96	168.03	++
Sp [μm]	1.04	5.44	15.5	0.92	197.36	+
Sv [μm]	0.556	2.46	4.46	0.98	156.66	+
St [μm]	1.6	7.9	20	0.93	187.12	+
Ssk	0.652	0.8	1.29	0.88	69.80	-
Sku	2.15	2.44	4.09	0.84	67.05	-
Parametry powierzchniowe i objętościowe						
STp [%]	40	7.5	2	-1.00	180.95	++
SHTp [μm]	1.06	4.62	8.04	0.98	152.62	++
Smmr [mm³/mm²]	0.000556	0.00246	0.00446	0.98	156.66	++
Smvr[mm³/mm²]	0.00104	0.00544	0.0155	0.92	197.36	++
Parametry przestrzenne						
SPc [wierz/mm²]	2.5	0.25	1	-0.79	180.00	-
Sds [wierz/mm²]	0	0	0	0.00	0.00	-
Str	0.0499	0.0852	0.103	1.00	66.90	+
Sal [mm]	0.0391	0.0783	0.09	0.99	73.63	+
Std [°]	16474	16474	16474	0.00	0.00	-
Sfd	2.39	2.18	2.13	-0.99	11.64	+
Parametry hybrydowe						
SΔq	0.0188	0.0483	0.146	0.88	179.07	+
Sdr [%]	0.0176	0.116	0.977	0.81	259.16	+
Parametry funkcjonalne						
Sbi	1	4.93	0.849	0.16	180.60	-
Sci	2.05	2.11	2.1	0.88	2.88	-
Svi	0.0243	0.0176	0.0136	-1.00	57.84	+

Analizując otrzymane wyniki badań chropowatości 2D można stwierdzić, że ze zwiększeniem się kroku KE wzdłuż osi x zwiększyły się wszystkie parametry amplitudowe chropowatości. Do grupy parametrów amplitudowych zalicza się także parametry statystyczne takie, jak skośność Rsk oraz kurtoza Rku . Ze względu na niewielką wartość współczynnika korelacji ρ , zmiana kroku KE wzdłuż osi x nie może być jednak opisywana przez te parametry. Zaobserwowano także zmiany dwóch parametrów długościowych RS , RSm . Świadczy to o zwiększeniu odległości pomiędzy kolejnymi wierzchołkami profilu oraz o zwiększeniu się szerokości rowków profilu. Zmiany te są widoczne także na zamodelowanych profilach chropowatości. Zwiększając krok KE wzdłuż osi x zmniejszeniu ulega także liczba miejscowych wzniesień, co zostało opisane przez parametry RPc i $RHSC$. Ostatnim parametrem, który wykazał znaczne zmiany wartości obu badanych współczynników oceny jest $R\delta c$. Znaczny wzrost jego wartości świadczy o zmianach udziału materiałowego na zadanych poziomach badania. Pozostałe parametry chropowatości 2D, ze względu na mały współczynnik korelacji ρ lub małą wartość współczynnika t , nie nadają się do opisu zamodelowanych zmian chropowatości profilu.

Analizując otrzymane wyniki badań chropowatości 3D można stwierdzić, że ze zwiększeniem się kroku KE wzdłuż osi x zwiększyły się, zgodnie z oczekiwaniami, wszystkie parametry amplitudowe chropowatości. Do grupy parametrów amplitudowych zalicza się także parametry statystyczne takie, jak skośność Ssk oraz kurtoza Sku . Ze względu na niewielką wartość współczynnika korelacji ρ , zmiana kroku KE wzdłuż osi x nie może być jednak opisywana przez te parametry. Pozostałe parametry funkcjonalne chropowatości (Sbi , Sci) nie wykazywały zależności od odległości śladów kształtowania KE. Wraz ze zmianami udziału nośnego zamodelowanej powierzchni silne zmiany zaobserwowano w grupie parametrów powierzchniowych i objętościowych (STp , $SHTp$, $Smmr$, Smv). Wydaje się także być zasadne zastosowanie parametrów przestrzennych Str i Sal do opisu zmian zamodelowanej cechy. Biorąc pod uwagę możliwy do uzyskania (z definicji wymiaru fraktalnego) zakres zmian wymiaru fraktalnego Sfd należy uznać również jego przydatność do opisu zamodelowanych zmian chropowatości. Jako uzupełnienie opisu zamodelowanych zmian zastosować można także parametry hybrydowe ($S\Delta q$, Sdr). Pozostałe parametry chropowatości 3D, ze względu na mały współczynnik korelacji ρ lub małą wartość współczynnika t , nie nadają się (są mało przydatne) do opisu zamodelowanych zmian chropowatości powierzchni.

7.3.2. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ ZMIENNĄ WYSOKOŚCIĄ KE

Do badań wybrano powierzchnię anizotropową, okresową, z różną wysokością KE w osi z. Profil chropowatości był modelowany poprzez przesunięcie, z zadaniem krokiem 0,2mm, KE w postaci elipsy. Jedną z osi elipsy miała stałą wielkość $x=0,5\text{mm}$. Wysokość drugiej osi elipsy przyjęto na trzech poziomach: $10\mu\text{m}$; $20\mu\text{m}$; $30\mu\text{m}$. Powierzchnia była modelowana poprzez „przeciągnięcie” profilu chropowatości wzdłuż osi y. Obrazy zamodelowanych profili i powierzchni pokazano na rys.7.8.



Rys.7.8. Widok profili i powierzchni zamodelowanych z różną wysokością KE:
a) $10\mu\text{m}$, b) $20\mu\text{m}$, c) $30\mu\text{m}$

Obliczone parametry chropowatości 2D i 3D oraz wskaźniki oceny tych parametrów zamieszczono w tabelach 7.3 i 7.4.

Tabela.7.3. Wpływ wysokości KE na parametry chropowatości 2D

Parametry	Poziomy zmian wysokości KE			ρ	t [%]	Przydat- ność
	10μm	20μm	30μm			
Parametry chropowatości 2D						
Parametry amplitudowe						
Ra [μm]	1.0237	2.0474	3.0712	1.00	100.00	++
Rq [μm]	1.2982	2.5964	3.8946	1.00	100.00	++
Rp [μm]	3.6748	7.3496	11.0244	1.00	100.00	++
Rv [μm]	1.1957	2.3914	3.5871	1.00	100.00	++
Rt [μm]	4.8705	9.7409	14.6115	1.00	100.00	++
Rsk	1.3552	1.3552	1.3552	0.00	0.00	-
Rku	4.1093	4.1093	4.1093	0.00	0.00	-
Rz [μm]	4.8705	9.7409	14.6115	1.00	100.00	++
Rc [μm]	4.8482	9.6963	14.5445	1.00	100.00	++
Rz(JIS) [μm]	4.8633	9.7266	14.5900	1.00	100.00	++
Parametry hybrydowe						
RΔq [°]	4.571	9.142	13.713	1.00	100.00	++
RΔa [°]	3.005	6.010	9.015	1.00	100.00	++
RVo [mm ³ /cm ²]	0.0244	0.0488	0.0732	1.00	100.00	++
Rλq [μm]	102.24	102.24	102.24	0.00	0.00	-
Parametry długościowe						
RSm [μm]	192.00	192.00	192.00	0.00	0.00	-
RS [μm]	200.00	200.00	200.00	0.00	0.00	-
RPc [wierz/cm]	45.5	45.5	5.5	-0.87	124.35	-
RLo [mm]	1.9860	2.0032	2.0300	0.99	2.19	+
RHSC [wierz]	9	9	9	0.00	0.00	-
Parametry odczytywane z krzywej udziału nośnego						
Rδc [μm]	4.8705	9.7409	14.6115	1.00	100.00	++
Rmr [%]	50.00	50.00	50.00	0.00	0.00	-
Rmr(C) [%]	37.23	37.23	37.23	0.00	0.00	-

Tabela.7.4. Wpływ wysokości KE na parametry chropowatości 3D

Parametry	Poziomy zmian wysokości KE			ρ	t [%]	Przydat- ność
	10μm	20μm	30μm			
Parametry chropowatości 3D						
Parametry amplitudowe						
Sa [μm]	1.02	2.05	3.07	1.00	100.16	++
Sq [μm]	1.31	2.61	3.92	1.00	99.87	++
Sp [μm]	3.81	7.62	11.4	1.00	99.74	++
Sv [μm]	1.19	2.37	3.56	1.00	99.86	++
St [μm]	5	10	15	1.00	100.00	++
Ssk	1.41	1.41	1.41	0.00	0.00	-
Sku	4.39	4.39	4.39	0.00	0.00	-
Parametry powierzchniowe i objętościowe						
STp [%]	5	5	5	0.00	0.00	-
SHTp [μm]	2.2	4.4	6.6	1.00	100.00	++
Smmr [mm³/mm²]	0.001193	0.002373	0.00356	1.00	99.65	++
Smvr[mm³/mm²]	0.00381	0.00762	0.0114	1.00	99.74	++
Parametry przestrzenne						
SPc [wierz/mm²]	2.5	0.25	2.5	0.00	128.57	-
Sds [wierz/mm²]	0	0	0	0.00	0.00	-
Str	0.0497	0.0497	0.0497	0.00	0.00	-
Sal [mm]	0.0352	0.0352	0.0352	0.00	0.00	-
Std [°]	16474	16474	16474	0.00	0.00	-
Sfd	2.41	2.41	2.41	0.00	0.00	-
Parametry hybrydowe						
SΔq	0.0848	0.17	0.254	1.00	99.76	++
Sdr [%]	0.354	1.35	2.86	0.99	164.72	++
Parametry funkcjonalne						
Sbi	1	1	1	0.00	0.00	-
Sci	2.9	2.9	2.9	0.00	0.00	-
Svi	0.0156	0.0156	0.0156	0.00	0.00	-

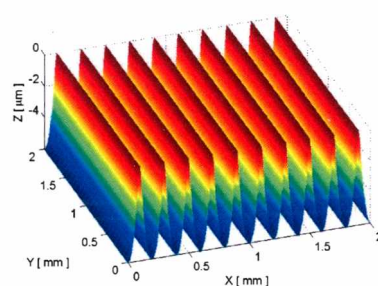
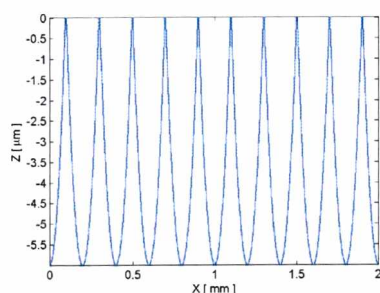
Analizując otrzymane wyniki badań chropowatości 2D można stwierdzić, że ze zwiększeniem się wysokości KE zwiększyły się wszystkie parametry amplitudowe chropowatości. Do grupy parametrów amplitudowych zalicza się także parametry statystyczne takie, jak skośność Rsk oraz kurtoza Rku . Ze względu na niewielką wartość współczynnika korelacji ρ , zmiana wysokości KE nie może być jednak opisywana przez te parametry. Na uwagę zasługuje również grupa parametrów hybrydowych. Objęte nią parametry zmieniały się (oprócz $R\lambda q$) na poziomie bardzo wysokim. Związane to jest ze zmianami kąta pochylenia zboczy, wynikłymi ze zmian wysokości KE i utrzymywaniu stałej odległości między nimi. Uzupełnieniem opisu zmian wysokości KE powinien być parametr $R\delta c$. Bardzo wysokie wartości współczynnika korelacji zarejestrowano dla RLo (rozwiniętej długości chropowatości). Pomimo niewielkich zmian procentowych jego wartości został także uznany za przydatny do opisu zamodelowanych zmian. Pozostałe parametry chropowatości 2D, ze względu na mały współczynnik korelacji ρ lub małą wartość współczynnika t , są mało przydatne do opisu zamodelowanych zmian chropowatości profilu.

Ze zwiększeniem się wysokości KE zwiększyły się wszystkie parametry amplitudowe chropowatości 3D. Do grupy parametrów amplitudowych zalicza się także parametry statystyczne takie, jak skośność Ssk oraz kurtoza Sku . Ze względu na niewielką wartość współczynnika korelacji ρ , zmiana wysokości KE nie może być jednak opisywana przez te parametry. Uzupełnienie opisu zamodelowanych zmian na powierzchni mogą stanowić parametry powierzchniowe i objętościowe wskazujące na znaczące zmiany średniej objętości pustek i średniej objętości materiału oraz zmiany wysokości obszaru nośności ($Smvr$, $Smmr$, $SHTp$). Znaczące są również zmiany wartości parametrów hybrydowych. Związane to jest ze zmianami kąta pochylenia zboczy, które powstawał przy modelowaniu zmian wysokości i utrzymywaniu stałego okresu ($S\Delta q$, Sdr). Pozostałe parametry chropowatości 3D, ze względu na mały współczynnik korelacji ρ lub małą wartość współczynnika t , są mało przydatne do opisu zamodelowanych zmian chropowatości powierzchni.

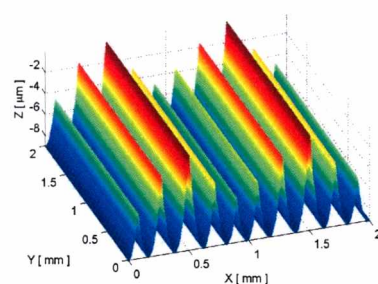
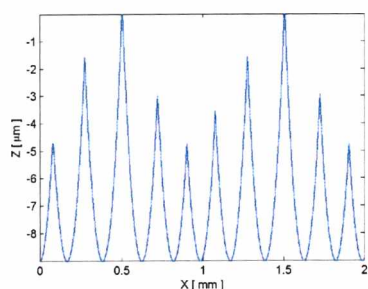
7.3.3. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ ZAKŁÓCENIAMI POŁOŻENIA KE WZDŁUŻ OSI X

Do badań wybrano powierzchnię anizotropową, okresową, z różną wielkością zakłóceń położenia KE wzdłuż osi x. Profil chropowatości był modelowany poprzez przemieszczenie KE wzdłuż osi x, z zadaniem krokiem 0,2mm. KE był elipsą o osiach $x=0,5\text{mm}$ i $z=150\mu\text{m}$. Położenie KE na osi x było zakłócanie losowo na trzech poziomach wysokości amplitudy drgań: 0mm, 0,03mm, 0,05mm. Przyjęto stałą ilość okresów amplitudy drgań - 2. Powierzchnia była modelowana poprzez „przeciągnięcie” profilu chropowatości wzdłuż osi y. Obrazy zamodelowanych profili i powierzchni pokazano na rys.7.9.

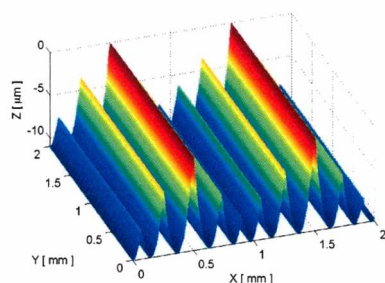
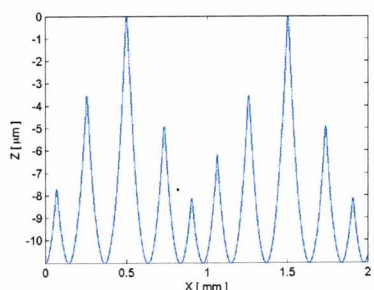
- a) Elipsa $x=0,5\text{mm}$, $z=150\mu\text{m}$, krok w osi x 0,2mm, amplituda drgań 0mm, ilość okresów na długości pola - 2



- b) Elipsa $x=0,5\text{mm}$, $z=150\mu\text{m}$, krok w osi x 0,2mm, amplituda drgań 0,03mm, ilość okresów na długości pola - 2



- c) Elipsa $x=0,5\text{mm}$, $z=150\mu\text{m}$, krok w osi x 0,2mm, amplituda drgań 0,05mm, ilość okresów na długości pola - 2



Rys.7.9. Widok profili i powierzchni zamodelowanych z zakłóceniami położenia KE w osi x:
a) 0mm, b) 0,03mm, c) 0,05mm

Obliczone parametry chropowatości 2D i 3D oraz wskaźniki oceny tych parametrów zamieszczono w tabelach 7.5 i 7.6.

Tabela.7.5. Wpływ zakłócenia położenia KE wzdłuż osi x na parametry chropowatości 2D

Parametry	Poziomy zmian zakłócenia położenia KE w osi x			ρ	t [%]	Przydat- ność
	0mm	0.03mm	0.05mm			
Parametry chropowatości 2D						
Parametry amplitudowe						
Ra [μm]	1.6148	1.7438	1.9739	0.96	20.20	-
Rq [μm]	1.8791	2.1367	2.5194	0.97	29.39	+
Rp [μm]	3.8803	6.8045	8.7102	1.00	74.71	++
Rv [μm]	2.1017	2.2494	2.4589	0.98	15.74	-
Rt [μm]	5.9820	9.0539	11.1692	1.00	59.38	++
Rsk	0.6543	1.0834	1.3891	1.00	70.50	++
Rku	2.1364	3.4728	4.4375	1.00	68.71	++
Rz [μm]	5.9820	9.0539	11.1692	1.00	59.38	++
Rc [μm]	5.9383	6.1930	6.6026	0.97	10.64	-
Rz(JIS) [μm]	5.9694	7.7147	8.6335	1.00	35.81	++
RΔq [°]	4.066	4.286	4.401	1.00	7.88	-
RΔa [°]	3.540	3.622	3.690	1.00	4.15	-
RVo [mm³/cm²]	0.0525	0.0512	0.0507	-0.99	3.50	-
Rλq [μm]	166.38	179.47	206.08	0.95	21.58	-
RSm [μm]	192.50	192.50	213.33	0.80	10.44	-
RS [μm]	200.00	204.37	207.50	1.00	3.68	-
RPc [wierz/cm]	45.5	45.5	45.5	0.00	0.00	-
RLo [mm]	1.9849	1.9854	1.9857	1.00	0.04	+
RHSC [wierz]	9	9	9	0.00	0.00	-
Rδc [μm]	5.9820	9.0539	11.1692	1.00	59.38	++
Rmr [%]	50.00	50.00	50.00	0.00	0.00	-
Rmr(C) [%]	42.39	40.55	37.78	-0.97	11.46	-

Tabela.7.6. Wpływ zakłócenia położenia KE wzdłuż osi x na parametry chropowatości 3D

Parametry	Poziomy zmian zakłócenia położenia KE w osi x			ρ	t [%]	Przydat- ność
	0mm	0.03mm	0.05mm			
Parametry chropowatości 3D						
Parametry amplitudowe						
Sa [μm]	1.62	1.75	1.98	0.96	20.19	-
Sq [μm]	1.88	2.14	2.52	0.98	29.36	+
Sp [μm]	3.91	6.82	8.66	1.00	73.49	++
Sv [μm]	2.09	2.17	2.34	0.95	11.36	-
St [μm]	6	8.99	11	1.00	57.71	+
Ssk	0.652	1.08	1.39	1.00	70.92	+
Sku	2.15	3.49	4.45	1.00	68.38	+
Parametry powierzchniowe i objętościowe						
STp [%]	10	2	1.5	-0.94	188.89	+
SHTp [μm]	3.98	3.59	4.1	0.11	13.11	-
Smmr [mm³/mm²]	0.00209	0.00217	0.00234	0.95	11.36	-
Smvr[mm³/mm²]	0.00391	0.00682	0.00866	1.00	73.49	+
Parametry przestrzenne						
SPc [wierz/mm²]	2.5	0.25	0.25	-0.92	225.00	-
Sds [wierz/mm²]	0	0	0	0.00	0.00	-
Str	0.0499	0.0502	0.0672	0.81	31.02	-
Sal [mm]	0.0391	0.0431	0.0509	0.96	26.60	+
Std [°]	16474	16474	16474	0.00	0.00	-
Sfd	2.39	2.29	2.24	-0.98	6.50	+
Parametry hybrydowe						
SΔq	0.0703	0.075	0.0762	0.98	7.99	-
Sdr [%]	0.247	0.281	0.289	0.97	15.42	-
Parametry funkcjonalne						
Sbi	1	0.95	0.711	-0.89	32.58	-
Sci	2.05	2.15	2.06	0.20	4.79	-
Svi	0.0243	0.0109	0.00992	-0.94	95.61	+

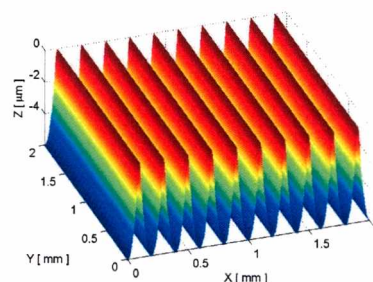
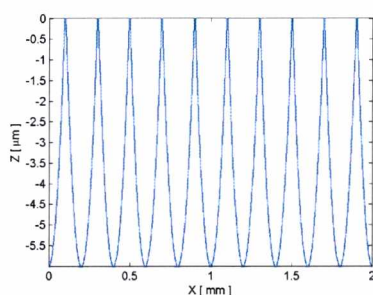
Analizując otrzymane wyniki badań chropowatości 2D można stwierdzić, że wprowadzenie zmiennych zakłóceń położenia KE wzdłuż osi x jest najlepiej opisywalne grupą parametrów amplitudowych (oprócz parametru Ra , który okazuje się być nieczuły na zakłócenia o charakterze sinusoidalnym). Także parametr Rc , czyli wysokość elementów profilu chropowatości, nie będzie przydatny do opisu tego typu zakłóceń. Spośród parametrów chropowatości z pozostałych grup jedynie $R\delta c$ wydaje się być odpowiednim do opisu drgań sinusoidalnych w osi x . Parametr ten jest ściśle związany z udziałem materiałowym, a jego zwiększenie świadczy o mniejszym przyroście udziału materiałowego wraz ze zwiększaniem się głębokości, na której badany jest profil. Bardzo wysokie wartości współczynnika korelacji zarejestrowano dla parametru RLo (rozwinętej długości chropowatości). Pomimo niewielkich zmian procentowych jego wartości został on także uznany za przydatny do opisu zamodelowanych zmian. Pozostałe parametry chropowatości 2D, ze względu na mały współczynnik korelacji ρ lub małą wartość współczynnika t , nie nadają się do opisu zamodelowanych zmian chropowatości profilu.

W przypadku analizy badań wyników chropowatości 3D można stwierdzić, że zakłócenia położenia KE wzdłuż osi x są najlepiej opisywalne grupą parametrów amplitudowych. Wraz ze zwiększeniem się poziomu zakłóceń zaobserwować można zmiany w charakterze powierzchni opisane parametrami amplitudowymi statystycznymi Ssk i Sku . Widoczne jest także zwiększenie się całkowitej wysokości chropowatości St . Wzrost ten nie jest rozłożony równomiernie pomiędzy Sp i Sv , ale wyraźnie skupia się na wzniesieniach - parametr Sp . Parametrami chropowatości silnie reagującymi na zakłócenie odległości KE są także średnia objętość pustek $Smvr$ oraz wskaźnik zatrzymania cieczy przez wgłębienia Svi . Zaobserwowano także wzrost wskaźnika udziału nośnego na zadanym poziomie STp . Bardzo wysokie wartości współczynnika korelacji zarejestrowano dla wymiaru fraktalnego Sfd oraz długości odcinka najszybszego zanikania funkcji autokorelacji Sal . Pomimo niewielkich zmian procentowych jego wartości został także uznany za mogący być przydatnym do opisu zamodelowanych zmian. Pozostałe parametry chropowatości 3D, ze względu na mały współczynnik korelacji ρ lub małą wartość współczynnika t , nie nadają się do opisu zamodelowanych zmian chropowatości powierzchni.

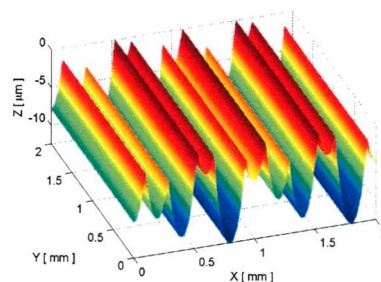
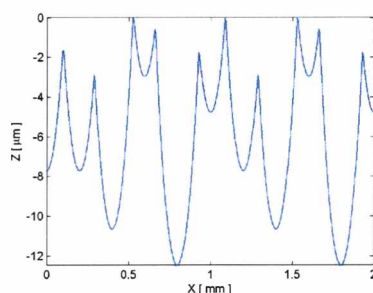
7.3.4. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ ZAKŁÓCENIAMI POŁOŻENIA KE W OSI Z

Do badań wybrano powierzchnię anizotropową, okresową, z różną wielkością zakłóceń położenia KE w osi z. Profil chropowatości był modelowany kształtami elementarnymi KE odległymi od siebie o 0,2mm. KE była elipsa o osiach $x=0,5\text{mm}$ i $z=150\mu\text{m}$. Położenie KE w osi z było zakłócanie drganiami harmonicznymi o trzech poziomach wysokości amplitudy: $0\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$. Przyjęto stałą liczbę 4 okresów drgań na długości analizowanego pola. Powierzchnia była modelowana poprzez „przeciągnięcie” profilu chropowatości wzdłuż osi y. Obrazy zamodelowanych profili i powierzchni pokazano na rys.7.10.

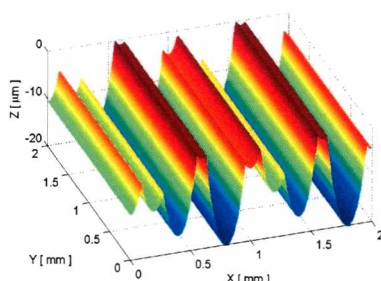
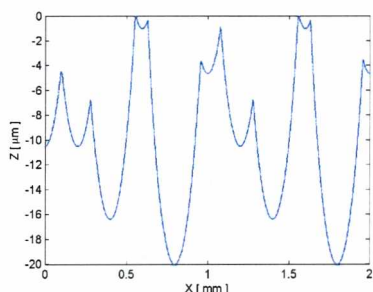
a) Elipsa $x=0,5\text{mm}$, $z=150\mu\text{m}$, krok w osi x 0,2mm, amplituda drgań $0\mu\text{m}$, ilość okresów na długości pola - 4



b) Elipsa $x=0,5\text{mm}$, $z=150\mu\text{m}$, krok w osi x 0,2mm, amplituda drgań $5\mu\text{m}$, ilość okresów na długości pola - 4



Elipsa $x=0,5\text{mm}$, $z=150\mu\text{m}$, krok w osi x 0,2mm, amplituda drgań $10\mu\text{m}$, ilość okresów na długości pola - 4



Rys.7.10. Widok profili i powierzchni zamodelowanych z zakłóceniami położenia KE w osi z:
a) $0\mu\text{m}$, b) $5\mu\text{m}$, c) $10\mu\text{m}$

Obliczone parametry chropowatości 2D i 3D oraz wskaźniki oceny tych parametrów zamieszczono w tabelach 7.7 i 7.8.

Tabela.7.7. Wpływ zakłóceń harmonicznych położenia KE w osi z na parametry chropowatości 2D

Parametry	Poziomy zmian zakłócenia położenia KE w osi z			ρ	t [%]	Przydat- ność
	0μm	5μm	10μm			
Parametry chropowości 2D						
Parametry amplitudowe						
Ra [μm]	1.6148	2.9576	4.7426	1.00	100.73	++
Rq [μm]	1.8791	3.4266	5.7011	0.99	104.17	++
Rp [μm]	3.8803	6.1899	10.8055	0.98	99.52	++
Rv [μm]	2.1017	6.3226	9.8464	1.00	127.17	++
Rt [μm]	5.9820	12.5125	20.6518	1.00	112.42	++
Rsk	0.6543	-0.1475	0.1102	-0.66	389.85	-
Rku	2.1364	1.8896	2.0006	-0.55	12.29	-
Rz [μm]	5.9820	12.5125	20.6518	1.00	112.42	++
Rc [μm]	5.9383	8.9208	16.5651	0.97	101.45	++
Rz(JIS) [μm]	5.9694	9.7986	14.0614	1.00	81.38	++
Parametry hybrydowe						
RΔq [°]	4.066	4.632	5.918	0.98	38.01	++
RΔa [°]	3.540	3.871	4.731	0.97	29.43	++
RVo [mm³/cm²]	0.0525	0.1509	0.2393	1.00	126.59	++
Rλq [μm]	166.38	266.33	346.80	1.00	69.44	+
Parametry długościowe						
RSm [μm]	192.50	307.50	468.75	1.00	85.55	+
RS [μm]	200.00	195.00	291.00	0.84	41.98	-
RPc [wierz/cm]	45.5	30.3	25.3	-0.96	59.94	+
RLo [mm]	1.9849	1.9863	1.9903	0.96	0.27	+
RHSC [wierz]	9	6	5	-0.96	60.00	++
Parametry odczytywane z krzywej udziału nośnego						
Rδc [μm]	5.9820	12.5125	20.6518	1.00	112.42	++
Rmr [%]	50.00	50.00	50.00	0.00	0.00	-
Rmr(C) [%]	42.39	50.27	49.86	0.84	16.59	-

Tabela.7.8. Wpływ zakłóceń harmonicznych położenia KE w osi z na parametry chropowatości 3D

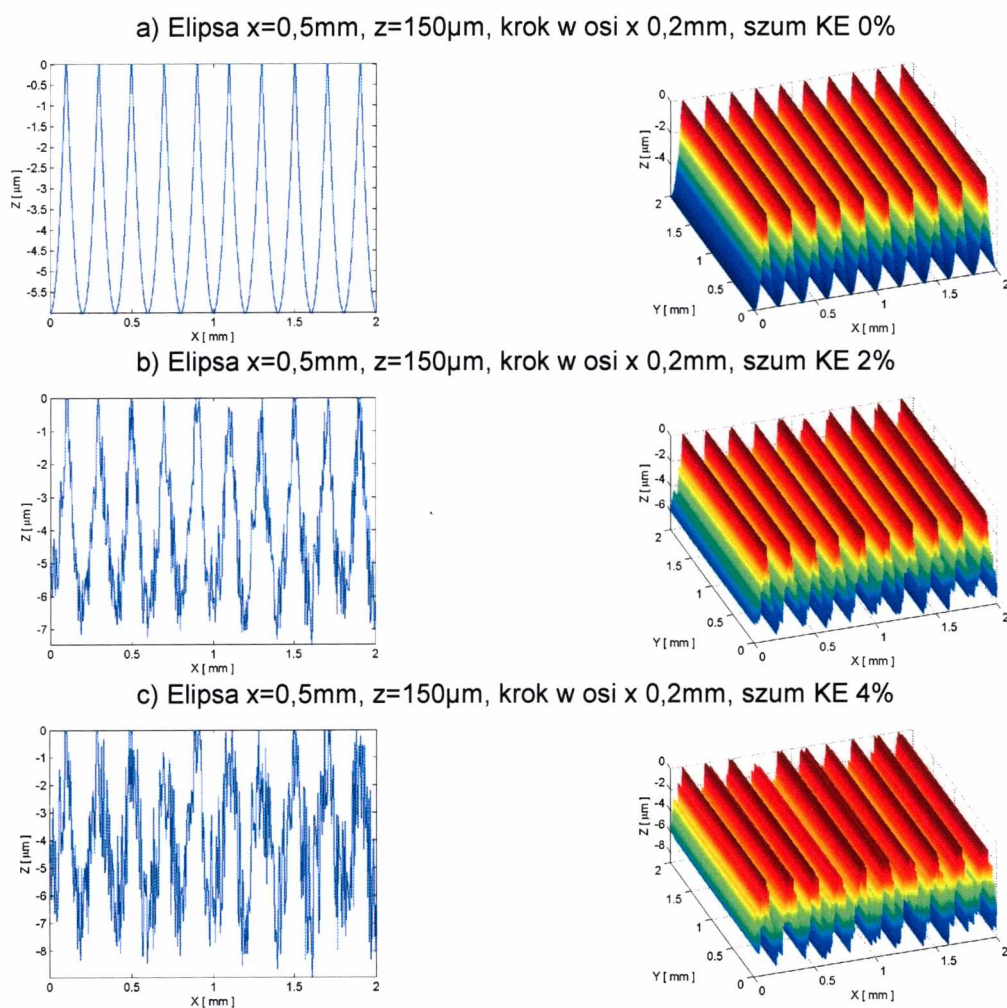
Parametry	Poziomy zmian zakłócenia położenia KE w osi z			ρ	t [%]	Przydat- ność
	0μm	5μm	10μm			
Parametry chropowatości 3D						
Parametry amplitudowe						
Sa [μm]	1.62	2.94	4.78	1.00	101.50	++
Sq [μm]	1.88	3.42	5.73	0.99	104.71	++
Sp [μm]	3.91	6.17	10.3	0.99	94.06	++
Sv [μm]	2.09	6.29	9.68	1.00	126.08	++
St [μm]	6	12.5	20	1.00	109.09	++
Ssk	0.652	-0.169	0.045	-0.71	466.48	-
Sku	2.15	1.92	1.97	-0.74	11.42	-
Parametry powierzchniowe i objętościowe						
STp [%]	10	5.3	8.8	-0.25	58.51	-
SHTp [μm]	3.98	7.03	11.6	0.99	101.11	++
Smmr [mm³/mm²]	0.00209	0.00629	0.00968	1.00	126.08	++
Smvr[mm³/mm²]	0.00391	0.00617	0.0103	0.99	94.06	++
Parametry przestrzenne						
SPc [wierz/mm²]	2.5	0	0.5	-0.76	250.00	-
Sds [wierz/mm²]	0	0	0	0.00	0.00	-
Str	0.0499	0.0853	0.103	0.98	66.88	++
Sal [mm]	0.0391	0.0744	0.09	0.98	75.04	++
Std [°]	16474	16474	16474	0.00	0.00	-
Sfd	2.39	2.21	2.13	-0.98	11.59	+
Parametry hybrydowe						
SΔq	0.0703	0.0803	0.103	0.98	38.68	++
Sdr [%]	0.247	0.321	0.522	0.97	75.69	++
Parametry funkcjonalne						
Sbi	1	3.52	7.25	0.99	159.30	++
Sci	2.05	1.44	1.59	-0.72	36.02	-
Svi	0.0243	0.0814	0.0747	0.81	94.96	-

Analizując otrzymane wyniki badań chropowatości 2D można stwierdzić, że jeśli kształtowana powierzchnia jest ostrzem, które drga harmonicznie w kierunku osi z , to zakłócenia tej powierzchni są najlepiej opisywalne grupą parametrów amplitudowych. Nie mają natomiast wpływu na dwa statystyczne amplitudowe parametry chropowatości Rsk i Rku . Można zatem stwierdzić, że nie są one użyteczne do opisu takich zmian. Cała grupa parametrów długościowych i hybrydowych ($R\Delta q$, $R\Delta a$, RVo , $R\lambda q$) wykazuje bardzo wysoką korelację z zamodelowanymi zmianami. Dla profilu zakłóconego funkcją sinus w osi z zaobserwowano także bardzo dużą korelację parametrów długościowych ($RHSC$, RPc , RSm) z zamodelowanymi zmianami. Spośród parametrów z pozostałych grup jedynie $R\delta c$ wydaje się być odpowiednim do opisu tego typu powierzchni. Parametr ten jest ściśle związany z tzw. udziałem materiałowym profilu. Zwiększenie parametru $R\delta c$ świadczy o mniejszym przyroście udziału materiałowego wraz ze zwiększaniem się głębokości, na której badany jest profil. Bardzo wysokie wartości współczynnika korelacji zarejestrowano dla RLo (rozwinętej długości chropowatości). Pozostałe parametry chropowatości 2D, ze względu na mały współczynnik korelacji ρ lub małą wartość współczynnika t , nie nadają się do opisu zamodelowanych zmian chropowatości profilu.

Na podstawie analizy wyników badań chropowatości 3D można stwierdzić, że podobnie jak w przypadku 2D, drgania harmoniczne toru kształtowania w osi z , są najlepiej opisywalne grupą parametrów amplitudowych. Zakłócenia położenia KE w osi z nie mają wpływu na dwa statystyczne amplitudowe parametry chropowatości Ssk i Sku . Dla powierzchni kształtowanej z zakłóceniami harmonicznymi toru narzędzia, wraz ze zwiększeniem się amplitudy drgań wyraźnie rośnie wysokość nierówności St , a także parametry hybrydowe ($S\Delta q$, Sdr) oraz parametry powierzchniowe i objętościowe $SHTp$, $Smmr$, Smv . Wyjątkiem jest parametr STp , który wykazał niskie wartości współczynnika korelacji ρ oraz współczynnika zmian procentowych badanego parametru chropowatości t . Parametrem z grupy parametrów funkcjonalnych, mogącym służyć do opisu zamodelowanych zmian jest wskaźnik powierzchni nośnej Sbi . Pozostałe parametry chropowatości 3D, ze względu na mały współczynnik korelacji ρ lub małą wartość współczynnika t , nie nadają się do opisu zmian chropowatości powierzchni wywołanych drganiami narzędzia.

7.3.5. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ ZMIENNĄ WIELKOŚCIĄ ZASZUMIENIA KE

Do badań wybrano powierzchnię anizotropową, okresową, z różną wielkością zaszumienia KE. Profil chropowatości był modelowany poprzez przesunięcie, z zadaniem krokiem 0,2mm, KE w postaci elipsy o osiach $x=0,5\text{mm}$ i $z=150\mu\text{m}$. KE był zakłócany szumem na trzech poziomach wysokości KE: 0%, 2%, 4%. Powierzchnia była modelowana poprzez „przeciągnięcie” profilu chropowatości wzdłuż osi y. Obrazy zamodelowanych profili i powierzchni pokazano na rys.7.11.



Rys.7.11. Widok profili i powierzchni zamodelowanych ze zmienną wielkością zaszumienia:
a) 0%, b) 2%, c) 4%

Obliczone parametry chropowatości 2D i 3D oraz wskaźniki oceny tych parametrów zamieszczono w tabelach 7.9 i 7.10.

Tabela.7.9. Wpływ wielkości zaszumienia KE na parametry chropowatości 2D

Parametry	Poziomy zmian wielkości zaszumienia KE			ρ	t [%]	Przydat- ność
	0%	2%	4%			
Parametry chropowatości 2D						
Parametry amplitudowe						
Ra [μm]	1.6148	1.6572	1.7674	0.97	9.08	+
Rq [μm]	1.8791	1.9237	2.0738	0.95	9.94	+
Rp [μm]	3.8803	4.3248	4.6037	0.99	16.94	+
Rv [μm]	2.1017	3.5710	5.0045	1.00	81.56	++
Rt [μm]	5.9820	7.8958	9.6083	1.00	46.32	++
Rsk	0.6543	0.4077	0.0552	-0.99	160.88	++
Rku	2.1364	2.0261	2.0794	-0.52	5.30	-
Rz [μm]	5.9820	7.8958	9.6083	1.00	46.32	++
Rc [μm]	5.9383	6.6222	7.4858	1.00	23.16	++
Rz(JIS) [μm]	5.9694	7.1265	8.4333	1.00	34.33	++
Parametry hybrydowe						
RΔq [°]	4.066	7.896	13.962	0.99	114.52	++
RΔa [°]	3.540	6.350	11.271	0.99	109.60	++
RVo [mm ³ /cm ²]	0.0525	0.0618	0.0866	0.97	50.92	++
Rλq [μm]	166.38	87.70	53.47	-0.98	110.14	++
Parametry długościowe						
RSm [μm]	192.50	192.50	192.50	0.00	0.00	-
RS [μm]	200.00	33.16	24.00	-0.89	205.32	+
RPc [wierz/cm]	45.5	65.7	131.3	0.96	106.14	++
RLo [mm]	1.9849	1.9987	2.0377	0.96	2.63	+
RHSC [wierz]	9	12	23	0.95	95.45	++
Parametry odczytywane z krzywej udziału nośnego						
Rδc [μm]	5.9820	7.8958	9.6083	1.00	46.32	++
Rmr [%]	50.00	50.00	50.00	0.00	0.00	-
Rmr(C) [%]	42.39	46.13	50.17	1.00	16.83	+

Tabela.7.10. Wpływ wielkości zaszumienia KE na parametry chropowatości 3D

Parametry	Poziomy zmian wielkości zaszumienia KE			ρ	t [%]	Przydat- ność
	0%	2%	4%			
Parametry chropowatości 3D						
Parametry amplitudowe						
Sa [μm]	1.62	1.72	2	0.96	21.35	+
Sq [μm]	1.88	2.01	2.35	0.97	22.60	+
Sp [μm]	3.91	3.96	4.06	0.98	3.77	-
Sv [μm]	2.09	3.49	4.89	1.00	80.23	++
St [μm]	6	7.46	8.95	1.00	39.49	++
Ssk	0.652	0.344	-0.0146	-1.00	203.77	++
Sku	2.15	2.05	1.99	-0.99	7.75	-
Parametry powierzchniowe i objętościowe						
STp [%]	10	10.5	11.5	0.98	14.06	-
SHTp [μm]	3.98	3.84	4.54	0.76	16.99	-
Smmr [mm³/mm²]	0.00209	0.00349	0.00489	1.00	80.23	++
Smvr[mm³/mm²]	0.00391	0.00396	0.00406	0.98	3.77	-
Parametry przestrzenne						
SPc [wierz/mm²]	2.5	9	0.5	-0.23	212.50	-
Sds [wierz/mm²]	0	0	0	0.00	0.00	-
Str	0.0499	0.0499	0.0497	-0.87	0.40	-
Sal [mm]	0.0391	0.0391	0.0352	-0.87	10.32	-
Std [°]	16474	16474	16474	0.00	0.00	-
Sfd	2.39	2.57	2.68	0.99	11.39	+
Parametry hybrydowe						
SΔq	0.0703	0.245	0.464	1.00	151.56	++
Sdr [%]	0.247	2.89	9.59	0.97	220.23	++
Parametry funkcjonalne						
Sbi	1	5.98	37.5	0.92	246.18	++
Sci	2.05	1.35	1.61	-0.62	41.92	-
Svi	0.0243	0.38	0.0885	0.17	216.54	+

Analizując otrzymane wyniki badań chropowatości 2D można stwierdzić, że im bardziej powierzchnia zmienia swój charakter ze zdeteminowanego na stochastyczny, w wyniku coraz większej szczyrbałości KE, to zmiany te najlepiej opisywalne są grupą parametrów hybrydowych. Poprzez nałożenie na KE szumu zamodelowano profile chropowatości zbliżone do tych, które otrzymać można w warunkach rzeczywistych np. podczas toczenia nożem o określonej szczyrbałości krawędzi.

Wszystkie badane parametry chropowatości za wyjątkiem RS – średniego odstępu miejscowych wzniesień profilu oraz Rku i Rmr wykazują dużą bądź bardzo dużą korelację ze zwiększeniem zaszumienia powierzchni. Pomimo niewielkich zmian wartości wskaźnika oceny t , do grupy parametrów przydatnych do opisu zamodelowanych zmian zaliczono także parametry Ra , Rq , Rp . Parametry te charakteryzują się dużymi wartościami współczynnika korelacji ρ z zamodelowanymi zmianami.

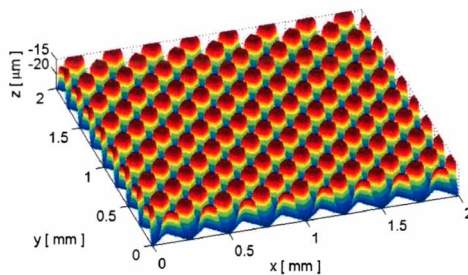
Stochastyczność powierzchni, powstała w wyniku zwiększającej się szczyrbałości KE najlepiej opisywalna jest grupą parametrów amplitudowych (wyjątkiem są parametry Sp i Sku). Parametry hybrydowe $S\Delta q$, Sdr oraz funkcjonalne Sbi , Svi także mogą być pomocne przy parametrycznym opisie tego rodzaju powierzchni. Zaszumienie powierzchni powoduje znaczne zmiany wartości wymiaru fraktalnego Sfd , a także średniej objętości materiału $Smmr$. Pozostałe parametry chropowatości 3D, ze względu na mały współczynnik korelacji ρ lub małą wartość współczynnika t , nie nadają się do opisu zamodelowanych zmian chropowatości powierzchni.

7.4. MODELE 3D Z CIĄGŁYMI ŚLADAMI KSZTAŁTOWANIA, KRZYŻUJĄCYMI SIĘ, PROSTOLINIOWYMI, O STAŁYM KĄCIE PRZECIĘCIA RYS

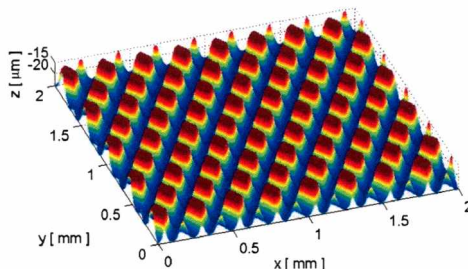
7.4.1. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ ZMIANAMI KĄTA PRZECIĘCIA ŚLADÓW

Do badań wybrano 3 powierzchnie anizotropowe charakteryzujące się okresowością. Powierzchnie te zostały zbudowane z 2 powierzchni wyjściowych o liniowych, równoległych śladach kształtowania. Powierzchnie te obracano wokół osi z o różny kąt, a następnie „składano” funkcją {min}. KE służącym do zamodelowania powierzchni wyjściowych była elipsa o osiach $x=0,2\text{mm}$ i $z=20\mu\text{m}$ przemieszczana wzdłuż osi x z krokiem $0,25\text{mm}$. Powierzchnia była modelowana poprzez „przeciągnięcie” profilu chropowatości wzdłuż osi y. Tak zamodelowaną powierzchnię obracano o kąty: 30° i -30° , 45° i -45° , 60° i -60° , a następnie składano. Wszystkie powierzchnie zostały ścięte na wysokości $15\mu\text{m}$. Obrazy zamodelowanych powierzchni pokazano na rys.7.12.

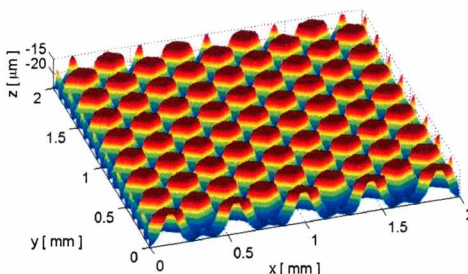
- a) Elipsa $x=0,2\text{ mm}$, $z=20\mu\text{m}$, krok w osi $x=0,25\text{mm}$, złożenie 2 powierzchni obróconych o kąt 30° i -30° , ścięcie na wysokości $15\mu\text{m}$



- b) Elipsa $x=0,2\text{ mm}$, $z=20\mu\text{m}$, krok w osi $x=0,25\text{mm}$, złożenie 2 powierzchni obróconych o kąt 45° i -45° , ścięcie na wysokości $15\mu\text{m}$



- c) Elipsa $x=0,2\text{ mm}$, $z=20\mu\text{m}$, krok w osi $x=0,25\text{mm}$, złożenie 2 powierzchni obróconych o kąt 60° i -60° , ścięcie na wysokości $15\mu\text{m}$



Rys.7.12. Widok powierzchni zamodelowanych ze zmianami kąta przecięcia śladów:
a) 30° i -30° , b) 45° i -45° , c) 60° i -60°

Obliczone parametry chropowatości 3D oraz wskaźniki oceny tych parametrów amieszczono w tabeli 7.11.

Tabela.7.11. Wpływ zmiany kąta przecięcia śladów na parametry chropowatości 3D

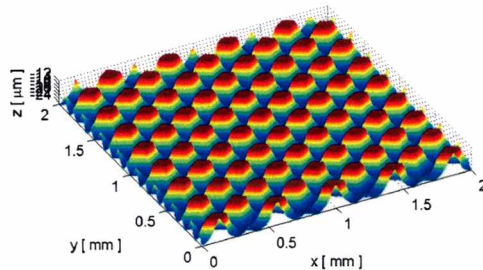
Parametry	Poziomy zmian kąta przecięcia śladów			ρ	t [%]	Przydatność
	30°	45°	60°			
Parametry chropowatości 3D						
Parametry amplitudowe						
Sa [μm]	3.33	3.35	3.33	0.00	0.60	-
Sq [μm]	3.72	3.75	3.72	0.00	0.80	-
Sp [μm]	5.75	5.73	5.75	0.00	0.35	-
Sv [μm]	4.2	4.22	4.2	0.00	0.48	-
St [μm]	9.95	9.95	9.95	0.00	0.00	-
Ssk	0.495	0.477	0.495	0.00	3.68	-
Sku	1.65	1.62	1.65	0.00	1.83	-
Parametry powierzchniowe i objętościowe						
STp [%]	22.4	24.6	22.4	0.00	9.51	-
SHTp [μm]	9.08	8.56	9.08	0.00	5.84	-
Smmr [mm³/mm²]	0.004	0.0042	0.004	0.00	4.92	-
Smvr[mm³/mm²]	0.0057	0.0057	0.0057	0.00	0.00	-
Parametry przestrzenne						
SPc [wierz/mm²]	0.25	0.25	0.25	0.00	0.00	-
Sds [wierz/mm²]	0	0	0	0.00	0.00	-
Str	0.575	0.841	0.575	0.00	40.08	-
Sal [mm]	0.047	0.042	0.047	0.00	11.03	-
Std [°]	31	45	59	1.00	62.22	++
Sfd	2.56	2.64	2.56	0.00	3.09	-
Parametry hybrydowe						
SΔq	0.139	0.171	0.139	0.00	21.38	-
Sdr [%]	0.964	1.47	0.964	0.00	44.67	-
Parametry funkcjonalne						
Sbi	1	1	1	0.00	0.00	-
Sci	1.53	1.51	1.53	0.00	1.31	-
Svi	0.0135	0.0178	0.0135	0.00	28.79	-

Analizując otrzymane wyniki badań chropowatości 3D można stwierdzić, że zmiana kąta przecięcia śladów kształtowania (obróbkowych) może być opisana jedynie jednym parametrem chropowatości: *Std* (kierunek tekstury powierzchni względem osi *y*). Wykazuje on znaczące zmiany wartości obu badanych wskaźników ρ i t . Pozostałe parametry chropowatości 3D nie są w ogóle wrażliwe na te cechy powierzchni ze względu na zerową wartość współczynnika korelacji ρ oraz bardzo małe zmiany wartości współczynnika t . Nie nadają się więc do opisu zamodelowanych zmian chropowatości powierzchni.

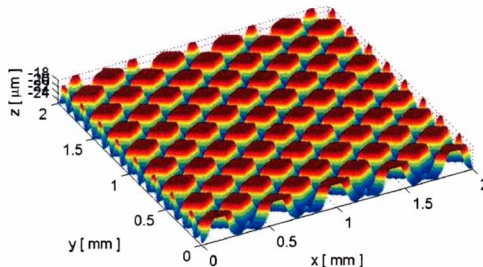
7.4.2. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ ZMIENNĄ WIELKOŚCIĄ ŚCIECIA POWIERZCHNI

Do badań wybrano 3 powierzchnie anizotropowe o krzyżujących się śladach obróbkowych. Powierzchnie te zostały zbudowane z 2 powierzchni wyjściowych, obróconych o kąt 60° i -60° wokół osi z, a następnie złożonych ze sobą. KE służącym do wykonania powierzchni wyjściowych była elipsa o osiach $x=0,2\text{mm}$ i $z=20\mu\text{m}$ przemieszczana wzdłuż osi x z krokiem $0,25\text{mm}$. Powierzchnia była modelowana poprzez „przeciągnięcie” tak powstałego profilu chropowatości wzdłuż osi y. Zamodelowaną w ten sposób powierzchnię „ścięto” na trzech poziomach: $12\mu\text{m}$, $18\mu\text{m}$, $24\mu\text{m}$. Obrazy zamodelowanych powierzchni pokazano na rys.7.13.

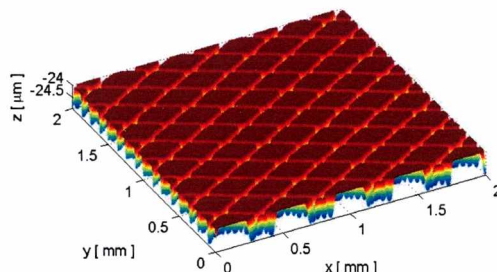
- a) Elipsa $x=0,2\text{ mm}$, $z=20\mu\text{m}$, krok w osi $x=0,25\text{mm}$, złożenie 2 powierzchni obróconych o kąt 60° i -60° , ścięcie na wysokości $12\mu\text{m}$



- b) Elipsa $x=0,2\text{ mm}$, $z=20\mu\text{m}$, krok w osi $x=0,25\text{mm}$, złożenie 2 powierzchni obróconych o kąt 60° i -60° , ścięcie na wysokości $18\mu\text{m}$



- c) Elipsa $x=0,2\text{ mm}$, $z=20\mu\text{m}$, krok w osi $x=0,25\text{mm}$, złożenie 2 powierzchni obróconych o kąt 60° i -60° , ścięcie na wysokości $24\mu\text{m}$



Rys.7.13. Widok powierzchni zamodelowanych ze zmienną wielkością ścięcia:
a) $12\mu\text{m}$, b) $18\mu\text{m}$, c) $24\mu\text{m}$

Obliczone parametry chropowatości 3D oraz wskaźniki oceny tych parametrów zamieszczono w tabeli 7.12.

abela.7.12. Wpływ wielkości ścięcia powierzchni na parametry chropowatości 3D

Parametry	Poziomy zmian wielkości ścięcia powierzchni			ρ	t [%]	Przydatność
	12μm	18μm	24μm			
Parametry chropowatości 3D						
Parametry amplitudowe						
Sa [μm]	3.92	2.51	0.221	-0.99	166.85	++
Sq [μm]	4.55	2.72	0.27	-1.00	170.29	++
Sp [μm]	8.25	3.47	0.156	-0.99	204.46	++
Sv [μm]	4.7	3.48	0.792	-0.98	130.67	++
St [μm]	12.9	6.95	0.948	-1.00	172.40	++
Ssk	0.757	0.172	-1.44	-0.97	-1289.82	++
Sku	2.09	1.35	3.48	0.64	92.34	++
Parametry powierzchniowe i objętościowe						
STp [%]	15.4	32.9	47.5	1.00	100.52	++
SHTp [μm]	9.3	6.41	0.412	-0.98	165.39	++
Smmr [mm³/mm²]	0.004	0.0034	0.00079	-0.94	117.58	++
Smvr[mm³/mm²]	0.0082	0.0034	0.00015	-0.99	205.53	++
Parametry przestrzenne						
SPc [wierz/mm²]	0	24.2	0	0.00	300.00	-
Sds [wierz/mm²]	0	0	0	0.00	0.00	-
Str	0.543	0.498	0.0338	-0.90	142.13	+
Sal [mm]	0.047	0.039	0.023	-0.98	66.06	++
Std [°]	59	59	59	0.00	0.00	-
Sfd	2.53	2.59	2.58	0.78	2.34	-
Parametry hybrydowe						
SΔq	0.162	0.111	0.0228	-0.99	141.18	++
Sdr [%]	1.3	0.618	0.026	-1.00	196.60	++
Parametry funkcjonalne						
Sbi	1	1	1	0.00	0.00	-
Sci	1.8	1.25	0.391	-0.99	122.84	++
Svi	0.0112	0.0186	0.185	0.88	242.74	-

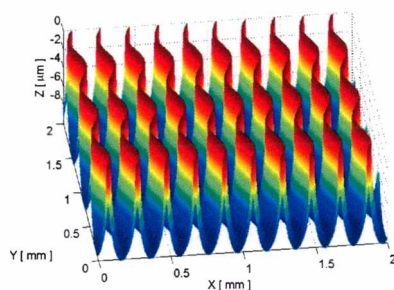
Analizując otrzymane wyniki badań chropowatości 3D można stwierdzić, że zmiana wielkości ścięcia (starcia) powierzchni powoduje znaczny spadek wartości parametrów amplitudowych. Można się było tego spodziewać albowiem jest to związane ze zmniejszaniem całkowitej wysokości powierzchni przez „ścieranie” idealną płaszczyzną bez zumu. Następowala zmiana charakteru powierzchni (zwiększenie się parametru Sku przy równoczesnym spadku parametru Ssk). Na szczególną uwagę zasługuje amplitudowy parametr Ssk , który szczególnie dobrze oddaje zmiany zachodzące w charakterze badanej powierzchni (zaobserwowano jednocześnie bardzo duże zmiany współczynnika korelacji ρ wskaźnika t). Na zmiany wynikające ze starcia wierzchołków nierówności bardzo mocno reagują również parametry z wszystkich pozostałych grup oprócz grupy parametrów rzestrzennych (za wyjątkiem wskaźnika tekstury Str oraz długości odcinka najszybszego zanikania funkcji autokorelacji $Sa()$). Wiąże się to ze wzrostem obszaru nośności (zwiększeniem się strefy wzajemnego styku) tak zamodelowanej powierzchni oraz ze zmianą średniego kąta nachylenia zboczy na badanych powierzchniach. Nieznaczące zmiany procentowe wartości wymiaru fraktalnego Sfd , przy małym współczynniku korelacji, nie pozwalają do uznania go za przydatny do opisu zamodelowanych zmian. Wraz ze zwiększeniem wielkości starcia nierówności, zaobserwować można także wyraźne zmniejszenie się wskaźnika zatrzymania cieczy przez rdzeń Sci . Pozostałe parametry chropowatości 3D, ze względu na mały współczynnik korelacji ρ lub małą wartość współczynnika t , nie nadają się do opisu zamodelowanych zmian chropowatości powierzchni.

7.5. MODELE POWIERZCHNI Z CIĄGŁYMI ŚLADAMI KSZTAŁTOWANIA, KRZYŻUJĄCYMI SIĘ, KRZYWOLINIOWYMI, SINUSOIDALNYMI

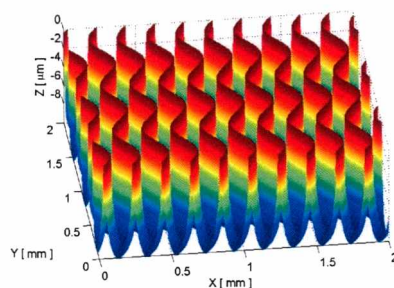
7.5.1. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ ZMIENNĄ AMPLITUdĄ DRGAŃ W PŁASZCZYŹNIE X-Y

Do badań wybrano powierzchnię anizotropową, okresową, z różną wielkością zakłóceń harmoniczných toru KE w płaszczyźnie X-Y wzdłuż osi y. Profil chropowatości był modelowany poprzez przemieszczenie skokowe, z zadanyą krokiem 0,2mm, KE wzdłuż osi x. KE był elipsą o osiach $x=0,2\text{mm}$ i $z=20\mu\text{m}$. Powierzchnia 3D była modelowana poprzez „przeciągnięcie” profilu chropowatości wzdłuż osi y. Tor KE w płaszczyźnie X-Y był zakłócany na trzech poziomach wartości amplitudy drgań: 0,04mm, 0,07mm, 0,1mm. Przyjęto stałą ilość okresów amplitudy drgań - 3. Obrazy zamodelowanych profili i powierzchni pokazano na rys.7.14.

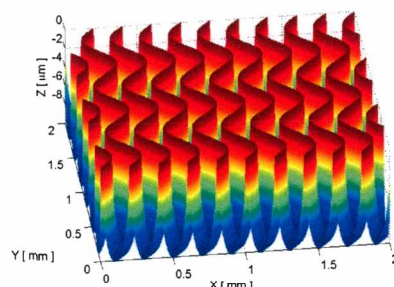
- a) Elipsa $x=0,2\text{ mm}$, $z=20\mu\text{m}$, krok w osi $x=0,2\text{mm}$, zakłócenia toru KE w płaszczyźnie X-Y amplituda 0,04mm, ilość okresów - 3



- b) Elipsa $x=0,2\text{ mm}$, $z=20\mu\text{m}$, krok w osi $x=0,2\text{mm}$, zakłócenia toru KE w płaszczyźnie X-Y amplituda 0,07mm, ilość okresów - 3



- c) Elipsa $x=0,2\text{ mm}$, $z=20\mu\text{m}$, krok w osi $x=0,2\text{mm}$, zakłócenia toru KE w płaszczyźnie X-Y amplituda 0,1mm, ilość okresów - 3



Rys.7.14. Widok powierzchni zamodelowanych ze zmienną wielkością zakłócenia toru KE w płaszczyźnie X-Y: a) 0,04mm, b) 0,07mm, c) 0,1mm

Obliczone parametry chropowatości 2D i 3D oraz wskaźniki oceny tych parametrów zamieszczono w tabeli 7.13.

Tabela.7.13. Wpływ amplitudy drgań w płaszczyźnie X-Y na parametry chropowatości 3D

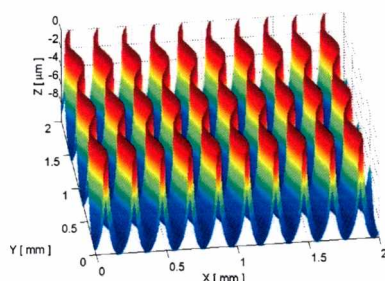
Parametry	Poziomy zmian amplitudy drgań w płaszczyźnie X-Y			ρ	t [%]	Przydat- ność
	0.04mm	0.07mm	0.1mm			
Parametry chropowatości 3D						
Parametry amplitudowe						
Sa [μm]	2.05	2.05	2.05	0.00	0.00	-
Sq [μm]	2.61	2.61	2.61	0.00	0.00	-
Sp [μm]	7.62	7.62	7.62	0.00	0.00	-
Sv [μm]	2.37	2.37	2.37	0.00	0.00	-
St [μm]	10	10	10	0.00	0.00	-
Ssk	1.41	1.41	1.41	0.00	0.00	-
Sku	4.39	4.39	4.39	0.00	0.00	-
Parametry powierzchniowe i objętościowe						
STp [%]	5	5	5	0.00	0.00	-
SHTp [μm]	4.4	4.4	4.4	0.00	0.00	-
Smmr [mm³/mm²]	0.00237	0.00237	0.00237	0.00	0.00	-
Smvr[mm³/mm²]	0.00762	0.00762	0.00762	0.00	0.00	-
Parametry przestrzenne						
SPc [wierz/mm²]	0.25	0.25	0.25	0.00	0.00	-
Sds [wierz/mm²]	0	0	0	0.00	0.00	-
Str	0.204	0.388	0.544	1.00	89.79	++
Sal [mm]	0.0352	0.0352	0.0352	0.00	0.00	-
Std [°]	17	17	8	-0.82	64.29	-
Sfd	2.43	2.47	2.5	1.00	2.84	+
Parametry hybrydowe						
SΔq	0.189	0.202	0.214	1.00	12.40	+
Sdr [%]	1.7	1.96	2.22	1.00	26.53	+
Parametry funkcjonalne						
Sbi	1	1	1	0.00	0.00	-
Sci	2.9	2.9	2.9	0.00	0.00	-
Svi	0.0156	0.0156	0.0156	0.00	0.00	-

Analizując otrzymane wyniki badań chropowatości 3D stwierdzono, że zmiana amplitudy drgań toru śladów kształtowania powierzchni w płaszczyźnie X-Y może być opisana przez następujące parametry chropowatości: S_{tr} wskaźnik tekstury powierzchni, Δq – średnie kwadratowe nachylenie nierówności powierzchni i S_{dr} - rozwinięcie powierzchni. Do parametrów mogących być przydatnymi do opisu zamodelowanych zmian zaliczono także wymiar fraktalny S_{fd} , mimo niewielkich zmian wielkości badanego współczynnika t . Pozostałe parametry chropowatości 3D, ze względu na mały współczynnik korelacji ρ lub małą wartość współczynnika t , nie nadają się do opisu zamodelowanych zmian chropowatości powierzchni.

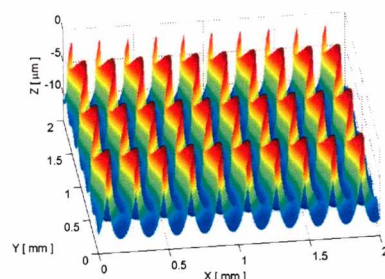
7.5.2. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ ZMIENNĄ ILOŚCIĄ OKRESÓW DRGAŃ W PŁASZCZYŹNIE Y-Z

Do badań wybrano powierzchnię anizotropową okresową z różną wielkością zakłóceń toru KE w płaszczyźnie Y-Z. Profil chropowatości był modelowany poprzez przesunięcia skokowe, z zadaniem krokiem 0,2mm, KE wzdłuż osi x. KE była elipsa o osiach $x=0,2\text{mm}$ i $z=20\mu\text{m}$. Powierzchnia była modelowana poprzez „przeciągnięcie” profilu chropowatości wzdłuż osi y. Przyjęto stałą wielkość amplitudy drgań w płaszczyźnie XY – 0,04mm. Tor KE w płaszczyźnie Y-Z był zakłócany na trzech poziomach wysokości amplitudy drgań: $0\mu\text{m}$, $2\mu\text{m}$, $4\mu\text{m}$. Przyjęto stałą ilość okresów amplitudy drgań - 3. Obrazy zamodelowanych profili i powierzchni pokazano na rys.7.15.

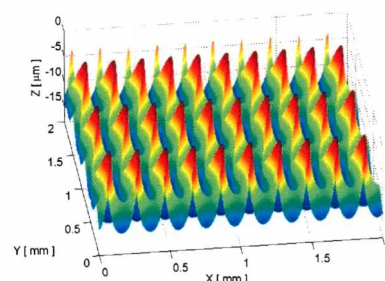
a) Elipsa $x=0,2\text{ mm}$, $z=20\mu\text{m}$, krok w osi $x=0,2\text{mm}$, zakłócenia toru KE w płaszczyźnie X-Y amplituda $0,04\text{mm}$, ilość okresów – 3, zakłócenia toru KE w płaszczyźnie Y-Z amplituda $0\mu\text{m}$, ilość okresów – 3,



b) Elipsa $x=0,2\text{ mm}$, $z=20\mu\text{m}$, krok w osi $x=0,2\text{mm}$, zakłócenia toru KE w płaszczyźnie X-Y amplituda $0,04\text{mm}$, ilość okresów – 3, zakłócenia toru KE w płaszczyźnie Y-Z amplituda $2\mu\text{m}$, ilość okresów – 3,



c) Elipsa $x=0,2\text{ mm}$, $z=20\mu\text{m}$, krok w osi $x=0,2\text{mm}$, zakłócenia toru KE w płaszczyźnie X-Y amplituda $0,04\text{mm}$, ilość okresów – 3, zakłócenia toru KE w płaszczyźnie Y-Z amplituda $4\mu\text{m}$, ilość okresów – 3,



Rys.7.15. Widok powierzchni zamodelowanych ze zmienną wielkością zakłócenia toru KE w płaszczyźnie Y-Z: a) $0\mu\text{m}$, b) $2\mu\text{m}$, c) $4\mu\text{m}$

Obliczone parametry chropowatości 2D i 3D oraz wskaźniki oceny tych parametrów zamieszczono w tabeli 7.14.

abela.7.14. Wpływ amplitudy drgań w płaszczyźnie Y-Z na parametry chropowatości 3D

Parametry	Poziomy zmian amplitudy drgań w płaszczyźnie Y-Z			ρ	t [%]	Przydat- ność
	0μm	2μm	4μm			
Parametry chropowatości 3D						
Parametry amplitudowe						
Δa [μm]	2.05	2.29	3.14	0.95	43.72	++
Δq [μm]	2.61	2.97	3.85	0.97	39.45	++
Δp [μm]	7.62	9.62	11.6	1.00	41.40	++
Δv [μm]	2.37	4.37	6.37	1.00	91.53	++
Δt [μm]	10	14	18	1.00	57.14	++
Δsk	1.41	0.956	0.439	-1.00	103.85	++
Δku	4.39	3.75	2.86	-1.00	41.73	++
Parametry powierzchniowe i objętościowe						
ΔTp [%]	5	1.7	1.16	-0.92	146.56	++
ΔHTp [μm]	4.4	4.81	6.82	0.93	45.29	++
Δmmr [mm³/mm²]	0.00237	0.00437	0.00637	1.00	91.53	++
Δmvr[mm³/mm²]	0.00762	0.00962	0.0116	1.00	41.40	++
Parametry przestrzenne						
ΔPc [wierz/mm²]	0.25	0	0.25	0.00	150.00	-
Δds [wierz/mm²]	0	0	0	0.00	0.00	-
Δtr	0.204	0.268	0.145	-0.48	59.81	-
Δal [mm]	0.0352	0.0431	0.101	0.92	110.09	+
Δtd [°]	17	17	17	0.00	0.00	-
Δfd	2.43	2.35	2.3	-0.99	5.51	+
Parametry hybrydowe						
ΔΔq	0.189	0.189	0.191	0.87	1.05	-
Δdr [%]	1.7	1.71	1.74	0.96	2.33	-
Parametry funkcjonalne						
Δbi	1	0.836	0.81	-0.92	21.54	+
Δci	2.9	2.01	1.74	-0.96	52.33	++
Δvi	0.0156	0.0593	0.0681	0.93	110.14	++

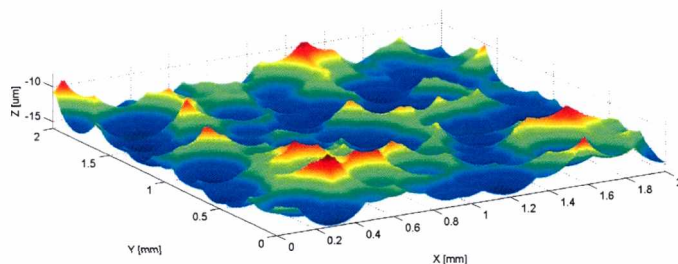
Analizując otrzymane wyniki badań chropowatości 3D stwierdzono, że zmiana amplitudy drgań harmoniczných KE w płaszczyźnie Y-Z, podczas kształtowania powierzchni, może być opisana przez wszystkie parametry chropowatości należące do grup: amplitudowe, powierzchniowe i objętościowe oraz funkcjonalne. Wprowadzenie zakłóceń toru KE charakterze sinusoidalnym w płaszczyźnie YZ spowodowało zwiększenie się całkowitej wysokości chropowatości S_t . Można stwierdzić, że wraz ze zmianą płaszczyzny generowania zakłóceń toru kształtowania z XY na YZ zmieniają się grupy parametrów dobrze bądź bardzo dobrze opisujące te zakłócenia. W przypadku drgań w płaszczyźnie YZ przydatnym do opisu zakłóceń powierzchni, ze względu na jednoczesne duże zmiany badanych współczynników ρ i t , wydaje się być zastosowanie długości odcinka najszybszego zanikania funkcji autokorelacji S_{al} . Grupę parametrów chropowatości przydatnych do opisu zamodelowanych zmian można uzupełnić o wymiar fraktalny S_{fd} . Pozostałe parametry chropowatości 3D, ze względu na mały współczynnik korelacji ρ lub małą wartość współczynnika oceny t , nie nadają się do opisu zamodelowanych zmian chropowatości powierzchni.

7.6. MODELE POWIERZCHNI Z DYSKRETNymi ŚLADAMI KSZTAŁTOWANIA, BEZKIERUNKOWYMI

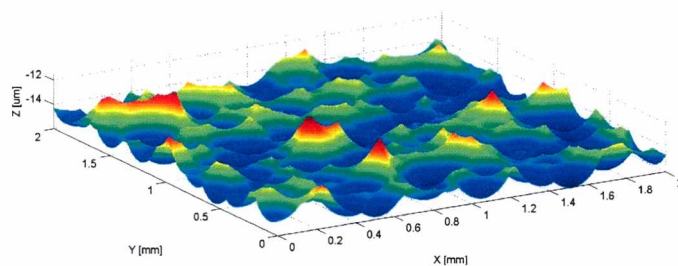
7.6.1. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ RÓŻNĄ LICZBĄ DYSKRETNYCH ŚLADÓW KSZTAŁTOWANIA

Do badań wykorzystano powierzchnię izotropową z różną liczbą dyskretnych śladów kształtowania. Powierzchnia była modelowana poprzez „odciśnięcie bezwzględne” kształtu elementarnego KE w postaci elipsoidy o osiach: $x=0,5\text{mm}$, $y=0,5\text{mm}$, $z=20\mu\text{m}$. Zagłębienia kształtu elementarnego o wartości $4\mu\text{m}$, zakłócano losowo w przedziale 50% tej wartości. Liczbę dyskretnych śladów kształtowania przyjęto na trzech poziomach 200, 600 i 1000. Obrazy zamodelowanych powierzchni pokazano na rys. 7.16.

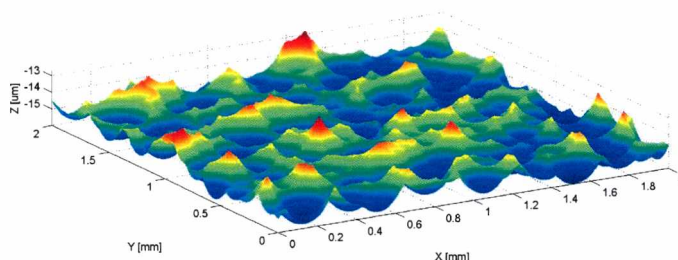
a) Elipsoida $x=0,5\text{mm}$, $y=0,5\text{mm}$, $z=20\mu\text{m}$, zagłębienie KE $4\mu\text{m}$, zakłócenie zagłębienia KE 50%,
200 śladów



b) Elipsoida $x=0,5\text{mm}$, $y=0,5\text{mm}$, $z=20\mu\text{m}$, zagłębienie KE $4\mu\text{m}$, zakłócenie zagłębienia KE 50%,
600 śladów



c) Elipsoida $x=0,5\text{mm}$, $y=0,5\text{mm}$, $z=20\mu\text{m}$, zagłębienie KE $4\mu\text{m}$, zakłócenie zagłębienia KE 50%,
1000 śladów



Rys.7.16. Widok powierzchni zamodelowanych z różną liczbą śladów kształtowania:
a) 200, b) 600, c) 1000

Obliczone parametry chropowatości 3D oraz wskaźniki oceny tych parametrów zamieszczono w tabeli 7.15.

abela.7.15. Wpływ liczby dyskretnych śladów KE na parametry chropowatości 3D

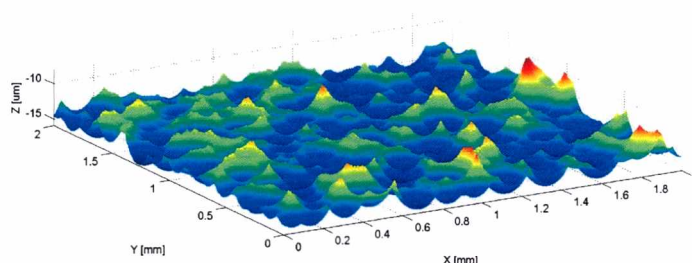
Parametry	Poziomy zmian liczby dyskretnych śladów KE			ρ	t [%]	Przydatność
	200	600	1000			
Parametry chropowatości 3D						
Parametry amplitudowe						
Δa [μm]	1.07	0.55	0.425	-0.94	94.62	+
Δq [μm]	1.3	0.685	0.52	-0.95	93.41	++
Δp [μm]	5.45	3.23	2.3	-0.97	86.07	++
Δv [μm]	2.49	1.31	1.02	-0.94	91.49	+
Δt [μm]	7.93	4.54	3.32	-0.96	87.59	++
Δsk	0.511	0.676	0.5	-0.06	31.30	-
Δku	2.79	3.37	2.85	0.09	19.31	-
Parametry powierzchniowe i objętościowe						
ΔTp [%]	0.1	0.4	1.2	0.97	194.12	++
ΔHTp [μm]	2.36	1.18	0.922	-0.94	96.68	+
Δmmr [mm³/mm²]	0.00249	0.00131	0.00102	-0.94	91.49	+
Δmvr[mm³/mm²]	0.00545	0.00323	0.0023	-0.97	86.07	++
Parametry przestrzenne						
ΔPc [wierzch/mm²]	0.25	1	0.25	0.00	150.00	-
Δds [wierzch/mm²]	72.5	98.5	112	0.98	41.87	++
Δtr	0.949	0.755	0.763	-0.85	23.59	-
Δal [mm]	0.183	0.111	0.0956	-0.94	67.30	+
Δtd [°]	45	45	45	0.00	0.00	-
Δfd	2.1	2.16	2.21	1.00	5.10	+
Parametry hybrydowe						
ΔΔq	0.0225	0.0156	0.0135	-0.96	52.33	+
Δdr [%]	0.0254	0.0122	0.00908	-0.94	104.88	+
Parametry funkcjonalne						
Δbi	0.42	0.343	0.383	-0.48	20.16	-
Δci	1.75	1.76	1.76	0.87	0.57	-
Δvi	0.0696	0.0687	0.0712	0.63	3.58	-

Analizując otrzymane wyniki badań można stwierdzić, że ze zwiększeniem się liczby śladów kształtowania zmniejszyły się wszystkie parametry wysokościowe chropowatości. Jest to zgodne z oczekiwaniami, bowiem przy tym sposobie modelowania powierzchni, w którym losowo kształt elementarny „odciska się” w warstwie wierzchniej, im większa liczba śladów kształtowania, tym powierzchnia musi stawać się mniej chropowata. Przy nieskończonej liczbie tych śladów powierzchnia powinna stać się idealnie gładka. Do grupy parametrów amplitudowych zalicza się także parametry statystyczne takie, jak skośność Ssk oraz kurtoza Sku . Ze względu na niewielką wartość współczynnika korelacji ρ , zmiana liczby dyskretnych śladów KE odciskanych na powierzchni nie może być jednak opisywana przez te parametry. Grupę parametrów dobrze opisujących zamodelowane zmiany można rozszerzyć o wszystkie parametry z grupy powierzchniowych i objętościowych, w szczególności o parametry STp , $Smvr$. Wzrost liczby śladów kształtowania KE powoduje również znaczący, sięgający 200% wzrost udziału nośnego powierzchni STp . Dużą zależność od liczby śladów kształtowania wykazują również parametry hybrydowe. Wartość tych maleje wraz ze wzrostem ilości „odciśniętych” na powierzchni KE. Pomimo niewielkich zmian procentowych współczynnika oceny t , zdecydowano się zaliczyć wymiar fraktalny Sfd do parametrów mogących opisywać zamodelowane zmiany. Zaobserwowana zmiana wartości współczynnika korelacji ρ sugeruje, że wraz ze wzrostem ilości odciskanych KE, w badanym zakresie zmian, rośnie stopień chaosu powierzchni. Pozostałe parametry chropowatości 3D, w tym cała grupa parametrów funkcjonalnych, ze względu na mały współczynnik korelacji ρ lub małą wartość współczynnika t , nie nadają się do opisu zamodelowanych zmian chropowatości powierzchni.

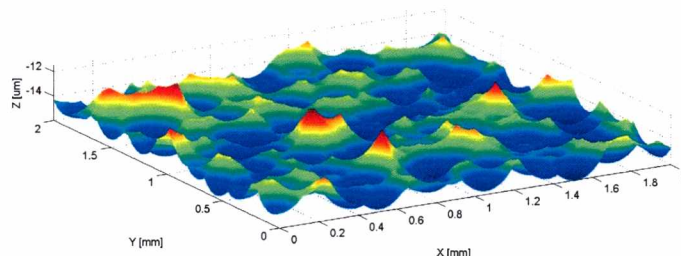
7.6.2. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ ZMIENNĄ WIELKOŚCIĄ KE

Do badań wykorzystano powierzchnię izotropową kształtowaną ze zmienną wielkością KE. Powierzchnia była modelowana poprzez „odciśnięcie bezwzględne” kształtu elementarnego KE w postaci elipsoidy. Zagłębienia kształtu elementarnego o wartości $4\mu\text{m}$, zakłócano losowo w przedziale 50% tej wartości. Wielkość KE przyjęto na trzech poziomach: $x=0,3\text{mm}$, $y=0,3\text{mm}$, $z=20\mu\text{m}$; $x=0,5\text{mm}$, $y=0,5\text{mm}$, $z=20\mu\text{m}$; oraz $x=0,7\text{mm}$, $y=0,7\text{mm}$, $z=20\mu\text{m}$. Obrazy zamodelowanych powierzchni pokazano na rys. 7.17.

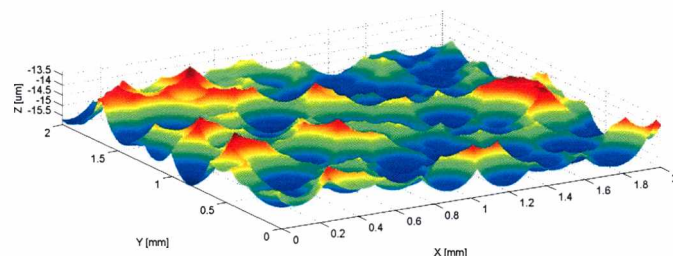
- a) Elipsoida $x=0,3\text{mm}$, $y=0,3\text{mm}$, $z=20\mu\text{m}$, zagłębienie KE $4\mu\text{m}$, zakłócenie zagłębienia KE 50%, 600 śladów



- b) Elipsoida $x=0,5\text{mm}$, $y=0,5\text{mm}$, $z=20\mu\text{m}$, zagłębienie KE $4\mu\text{m}$, zakłócenie zagłębienia KE 50%, 600 śladów



- c) Elipsoida $x=0,7\text{mm}$, $y=0,7\text{mm}$, $z=20\mu\text{m}$, zagłębienie KE $4\mu\text{m}$, zakłócenie zagłębienia KE 50%, 600 śladów



Rys.7.17. Widok powierzchni zamodelowanych z różną wielkością KE: a) $x=0,3\text{mm}$, $y=0,3\text{mm}$, $z=20\mu\text{m}$, b) $x=0,5\text{mm}$, $y=0,5\text{mm}$, $z=20\mu\text{m}$, c) $x=0,7\text{mm}$, $y=0,7\text{mm}$, $z=20\mu\text{m}$

Obliczone parametry chropowatości 3D oraz wskaźniki oceny tych parametrów zamieszczono w tabeli 7.16.

abela.7.16. Wpływ wielkości KE na parametry chropowatości 3D

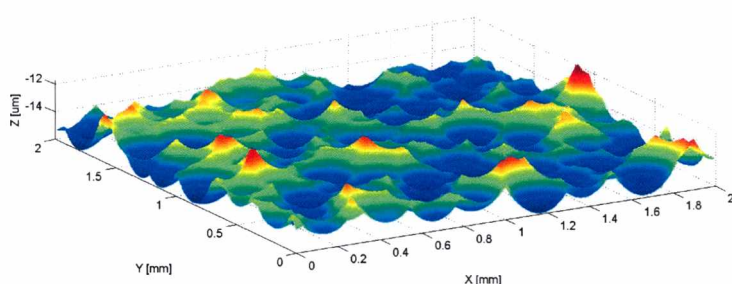
Parametry	Poziomy zmian wielkości KE			ρ	t [%]	Przydat- ność
	0.3mm	0.5mm	0.7mm			
Parametry chropowatości 3D						
Parametry amplitudowe						
Δa [μm]	0.844	0.55	0.408	-0.98	72.59	++
Δq [μm]	1.05	0.685	0.498	-0.98	74.16	++
Δp [μm]	6.04	3.23	1.69	-0.99	119.07	++
Δv [μm]	2	1.31	0.955	-0.98	73.51	++
Δt [μm]	8.04	4.54	2.65	-0.99	106.17	++
Δsk	0.685	0.676	0.487	-0.89	32.14	-
Δku	3.46	3.37	2.67	-0.91	24.95	-
Parametry powierzchniowe i objętościowe						
ΔTp [%]	0	0.4	10.5	0.88	288.99	+
ΔHTp [μm]	1.8	1.18	0.888	-0.98	70.73	++
Δmmr [mm³/mm²]	0.002	0.00131	0.000955	-0.98	73.51	++
Δmvr[mm³/mm²]	0.00604	0.00323	0.00169	-0.99	119.07	++
Parametry przestrzenne						
ΔPc [wierz/mm²]	0.25	1	1.5	0.99	136.36	++
Δds [wierz/mm²]	149	98.5	87.3	-0.94	55.29	-
Δtr	0.874	0.755	0.777	-0.77	14.84	-
Δal [mm]	0.0855	0.111	0.162	0.98	64.02	++
Δtd [°]	63.5	45	45	-0.87	36.16	-
Δfd	2.22	2.16	2.15	-0.92	3.22	-
Parametry hybrydowe						
ΔΔq	0.0337	0.0156	0.00908	-0.97	126.52	++
Δdr [%]	0.0568	0.0122	0.00413	-0.93	216.07	+
Parametry funkcjonalne						
Δbi	0.256	0.343	0.64	0.95	92.98	++
Δci	1.77	1.76	1.78	0.50	1.13	-
Δvi	0.0725	0.0687	0.0714	-0.28	5.36	-

Analizując otrzymane wyniki badań można stwierdzić, że ze zwiększeniem się wielkości śladów kształtowania zmniejszyły się wszystkie parametry wysokościowe chropowatości. Do grupy parametrów amplitudowych zalicza się także parametry statystyczne takie, jak skośność S_{sk} oraz kurtoza S_{ku} . Ze względu na niewielką wartość współczynnika korelacji ρ , zmiana wielkości dyskretnych śladów KE odciskanych na powierzchni nie może być jednak opisywana przez te parametry. Grupę parametrów dobrze opisujących zamodelowane zmiany można rozszerzyć o wszystkie parametry z grupy powierzchniowych i objętościowych S_{HTp} , S_{mmr} , S_{mvr} . Zmiana wielkości śladów KE powoduje również znaczący, bo sięgający 300% wzrost udziału nośnej powierzchni S_{Tp} . Wysoki poziom zmian badanych współczynników wykazują również parametry hybrydowe Δq , S_{dr} . Jako uzupełniające opis można zastosować takie parametry, jak: gęstość wierzchołków S_{Pc} , długość zanikania funkcji autokorelacji S_{al} oraz wskaźnik powierzchni nośnej S_{bi} . Pozostałe parametry chropowatości 3D, ze względu na mały współczynnik korelacji ρ lub małą wartość współczynnika t , nie nadają się do opisu zamodelowanych zmian chropowatości powierzchni.

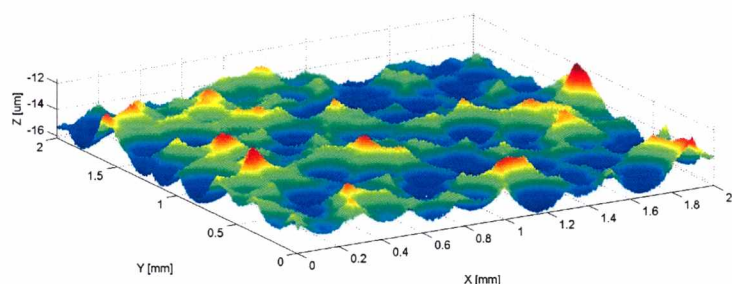
7.6.3. WYBÓR PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI DO OCENY TOPOGRAFII POWIERZCHNI CHARAKTERYZUJĄCEJ SIĘ ZMIENNĄ WIELKOŚCIĄ ZASZUMIENIA KE

Do badań wykorzystano powierzchnię izotropową ze zmienną wielkością zaszumienia nałożonego na KE. Powierzchnia była modelowana poprzez „odciśnięcie” kształtu elementarnego KE w postaci elipsoidy o osiach: $x=0,5\text{mm}$, $y=0,5\text{mm}$, $z=20\mu\text{m}$. Zagłębienia kształtu elementarnego o wartości $4\mu\text{m}$, zakłócano losowo w przedziale 50% tej wartości. Wartość zaszumienia KE przyjęto na trzech poziomach: $0\mu\text{m}$, $2\mu\text{m}$, $4\mu\text{m}$. Obrazy zamodelowanych powierzchni pokazano na rys. 7.18.

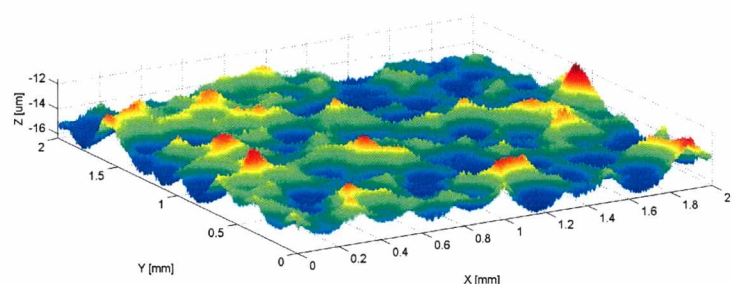
- a) Elipsoida $x=0,5\text{mm}$, $y=0,5\text{mm}$, $z=20\mu\text{m}$, zagłębienie KE $4\mu\text{m}$, zakłócenie zagłębienia KE 50%, 600 śladów, szum $0\mu\text{m}$



- b) Elipsoida $x=0,5\text{mm}$, $y=0,5\text{mm}$, $z=20\mu\text{m}$, zagłębienie KE $4\mu\text{m}$, zakłócenie zagłębienia KE 50%, 600 śladów, szum $2\mu\text{m}$



- c) Elipsoida $x=0,5\text{mm}$, $y=0,5\text{mm}$, $z=20\mu\text{m}$, zagłębienie KE $4\mu\text{m}$, zakłócenie zagłębienia KE 50%, 600 śladów, szum $4\mu\text{m}$



Rys.7.18. Widok powierzchni zamodelowanych z różną wielkością zaszumienia KE:
a) $0\mu\text{m}$, b) $2\mu\text{m}$, $4\mu\text{m}$

Obliczone parametry chropowatości 3D oraz wskaźniki oceny tych parametrów zamieszczono w tabeli 7.17.

Tabela.7.17. Wpływ wielkości zaszumienia KE na parametry chropowatości 3D

Parametry	Poziomy zmian wielkości zaszumienia KE			ρ	t [%]	Przydatność
	0μm	2μm	4μm			
Parametry chropowatości 3D						
Parametry amplitudowe						
Sa [μm]	0.528	0.533	0.546	0.97	3.36	-
Sq [μm]	0.653	0.659	0.676	0.96	3.47	-
Sp [μm]	3	3.04	3.12	0.98	3.93	-
Sv [μm]	1.28	1.46	1.62	1.00	23.39	-
St [μm]	4.28	4.49	4.74	1.00	10.21	-
Ssk	0.539	0.51	0.44	-0.97	19.95	-
Sku	3.01	3	2.97	-0.96	1.34	-
Parametry powierzchniowe i objętościowe						
STp [%]	0.4	0.3	0.3	-0.87	30.00	-
SHTp [μm]	1.15	1.15	1.17	0.87	1.73	-
Smmr [mm³/mm²]	0.00128	0.00146	0.00162	1.00	23.39	-
Smvr[mm³/mm²]	0.003	0.00304	0.00312	0.98	3.93	-
Parametry przestrzenne						
SPc [wierz/mm²]	0.25	0.5	1.5	0.94	166.67	++
Sds [wierz/mm²]	114	3263	4034	0.94	158.68	++
Str	0.861	0.857	0.859	-0.50	0.47	-
Sal [mm]	0.118	0.118	0.119	0.87	0.85	-
Std [°]	45	45	0.5	-0.87	147.51	-
Sfd	2.2	2.39	2.51	0.99	13.10	+
Parametry hybrydowe						
SΔq	0.015	0.0466	0.0863	1.00	144.62	++
Sdr [%]	0.0113	0.108	0.372	0.97	220.25	++
Parametry funkcjonalne						
Sbi	0.36	0.356	0.354	-0.98	1.68	-
Sci	1.76	1.75	1.73	-0.98	1.72	-
Svi	0.0725	0.0757	0.0832	0.97	13.87	-

Analizując otrzymane wyniki badań chropowatości 3D stwierdzono, że zmiany wielkości zaszumienia KE mogą być opisywane najlepiej przez wszystkie parametry chropowatości należące do grupy hybrydowych (S Δ q, Sdr). Odznaczają się one wysokimi wskaźnikami oceny ρ i t . Jako ich uzupełnienie wydaje się być wskazane użycie parametrów przestrzennych (SPc i Sds) informujących o gęstości wierzchołków chropowatości na powierzchni. Ostatnim z parametrów mogących dobrze opisywać zamodelowane zmiany jest wymiar fraktalny Sfd mimo, iż wskaźnik oceny t nie przybierał wysokich wartości. Pozostałe parametry chropowatości 3D, ze względu na mały współczynnik korelacji ρ lub małą wartość współczynnika t , nie nadają się do opisu zamodelowanych zmian chropowatości powierzchni.

8. WNIOSKI

Przeprowadzona badania doświadczalne oraz analiza teoretyczna pozwalają na formułowanie następujących wniosków końcowych.

- 1) Wykorzystując opracowany program *modelowanie_skr* można zamodelować niemal dowolne, bardzo skomplikowane powierzchnie, w tym powierzchnie o topografiach zbliżonych do uzyskiwanych w warunkach rzeczywistych. Można także modelować dużą różnorodność zakłóceń czy błędów, jakie występują na powierzchniach rzeczywistych.
- 2) W wielu przypadkach powierzchnie wirtualne, z racji szybkości i łatwości ich otrzymywania, a także z powodu możliwości niemal dowolnego modelowania ich kształtów i wielkości, mogą być bardzo przydatne w badaniach analityczno-doświadczalnych.
- 3) Zaletą zaproponowanego matematycznego modelowania chropowatości powierzchni jest całkowite pozbycie się błędów powtarzalności pomiaru chropowatości, jakie powstają podczas badań powierzchni rzeczywistych, a także wyeliminowanie efektu filtracji mechanicznej igły profilografometru, które to błędy mogą zakłócać analizę badanych hipotez.
- 4) Opracowane oprogramowanie umożliwia modelowanie powierzchni o dużym stopniu podobieństwa do powierzchni rzeczywistych, mimo iż samo modelowanie nie uwzględnia wielu zjawisk mechaniki oddzielania materiału, jakie występują podczas kształtowania powierzchni.
- 5) Do oceny przydatności poszczególnych parametrów chropowatości do opisu określonej cechy modelu chropowatości powierzchni należy wziąć pod uwagę nie tylko współczynnik korelacji ρ , ale także współczynnik t opisujący zmiany wartości badanych parametrów.
- 6) Do opisu tej samej cechy modelu topografii powierzchni, określonej w układzie płaskim i przestrzennym można stosować, o ile jest to możliwe te same parametry chropowatości określone odpowiednio w układzie 2D i 3D.
- 7) W przypadku powierzchni kształtowanych (modelowanych) w sposób dyskretny wartości parametrów chropowatości 3D są w znacznym stopniu zależne od ilości odwzorowanych kształtów elementarnych, ich wielkości, zakłóceń losowych wielkości kształtu elementarnego, zakłóceń losowych położenia kształtu elementarnego.

- 8) Zgodnie z oczekiwaniami stwierdzono, że na zmiany wysokości nierówności powierzchni najlepiej reagują parametry amplitudowe, natomiast na zmiany okresu występowania śladów – parametry długościowe.
- 9) Kąt przecięcia śladów obróbki nie ma istotnego wpływu na wartość parametrów chropowatości 3D za wyjątkiem parametru *Std* - kierunku tekstury powierzchni względem osi *y*.
- 10) Zastosowanie wymiaru fraktalnego *Sfd*, jako uniwersalnego narzędzia do opisu złożoności (losowości) powierzchni wymaga przeprowadzenia dalszych badań. Stwierdzono bowiem przypadki braku zależności tego parametru od zwiększania się stochastycznego charakteru powierzchni.
- 11) Stwierdzono, że wraz ze zmianą płaszczyzny generowania zakłóceń harmonicznym z *XY* na *YZ* zmieniają się grupy parametrów chropowatości 3D przydatne do opisu tak zamodelowanych zakłóceń. Drgania generowane w płaszczyźnie *XY* opisywane są przez parametry przestrzenne oraz hybrydowe, natomiast generowane w płaszczyźnie *YZ* powinny być opisywane przez parametry grup: amplitudowe, funkcjonalne oraz powierzchniowe i objętościowe.
- 12) W następnych etapach wydaje się celowym przeprowadzenie prac badawczych nad możliwością modelowania wpływu zjawisk fizycznych na chropowatość powierzchni i rozszerzenie o ten moduł możliwości obliczeniowych stworzonego programu komputerowego *modelowanie_skr*.

. LITERATURA

- [1] Adamczak S.: Normalizacja pomiarów struktury geometrycznej powierzchni cz.7. Ocena chropowatości i falistości – informacje podstawowe. *Mechanik* 5-6/2005, str.492-495.
- [2] Alauddin M., El Baradie M.A., Hashmi M.S.J.: Computer-aided analysis of a surface-roughness model for end milling. *Journal of Materials Processing Technology* 55/1995, str. 123-127.
- [3] Baek D.K., Tae J.K., Hee S.K.: Optimization of feedrate in a face milling operation using a surface roughness model. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 41/2001, str. 451-462.
- [4] Biszcza R., Cichosz P., Kowalski M., Kuzinowski M.: Korelacja parametrów chropowatości z wybranymi modelami topografii powierzchni. Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej - WW '02. Gorzów Wlkp.-Poznań, 13 listopada 2002, str.403-410.
- [5] Biszcza R., Cichosz P., Kowalski M., Kuzinowski M.: Matematyczne modelowanie topografii powierzchni. Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej - WW '02. Gorzów Wlkp.-Poznań, 13 listopada 2002, str. 395-402.
- [6] Blackmore D., Zhou G.: A new fractal model for anisotropic surfaces. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 38/1998, str. 551-557.
- [7] Brammertz P.-H.: Die Entstehung der Oberflächenrauheit beim Feindreihen. *Industrie - Anzeiger*, Essen, 2/1961, str. 25-32.
- [8] Broll S., Grzesik W.: Zastosowanie analizy fraktalnej do oceny profili chropowatości powierzchni. Zagadnienia inżynierii powierzchni w obróbce skrawaniem. Międzynarodowe sympozjum Inżynieria Powierzchni'99, Wrocław-Szklarska Poręba 7-9.06.1999. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999, str.37-44.
- [9] Burakowski T., Wierchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. WNT, Warszawa 1995.
- [10] Chen Q., Yang S., Li Z.: Surface roughness evaluation by using wavelets analysis. *Precision Engineering* 23, (1999) str.209-212.
- [11] Cichosz P., Kowalski M., Kuzinovski M.: Modelowanie matematyczne powierzchni szlifowanych obwodowo i czołowo. Obróbka ścierna. Tendencje rozwoju. XXVI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej red. Andrzej Koziański i Andrzej Gołębczak. Łódź, 9-12 września 2003. Łódź: Katedra Technologii Maszyn Politechniki Łódzkiej, Łódź 2003.
- [12] Cichosz P., Kowalski M., Kuzinowski M.: Matematicko modelirane na topografijata na deterministicki površini. Matematyczne modelowanie topografii powierzchni zdeterminowanych. W: Manufacturing and management in 21st century. Production and Industrial Engineering Association. Scientific conference with international participation. Conference proceedings. University "Ss. Cyril and Methodius" - Skopje. Faculty of Mechanical Engineering. Ohrid, Republic of Macedonia, September 16-17, 2004. str. 106-111.
- [13] Cichosz P., Kowalski M., Kuzinowski M.: Matematicko modelirane na topografijata na stochasticki površini. Matematyczne modelowanie topografii powierzchni losowych. Manufacturing and management in 21st century. Production and Industrial Engineering Association. Scientific conference with international participation. Conference proceedings. University "Ss. Cyril and Methodius" - Skopje. Faculty of Mechanical Engineering. Ohrid, Republic of Macedonia, September 16-17, 2004, str. 112-117.

- [14] Cichosz P., Kowalski M., Szubzda B.: Wpływ chropowatości powierzchni na rezystancję zestykową. Zagadnienia inżynierii powierzchni w obróbce skrawaniem. Inżynieria powierzchni '99. Międzynarodowe sympozjum. Wrocław-Szklarska Poręba, 7-9.06.1999. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999, str. 61-70.
- [15] Cichosz P., Kowalski M.: Modelowanie matematyczne topografii powierzchni płaskowierzchołkowych typu "plateau". XXVII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej. Koszalin-Sarbinowo, 19-22 września 2004. Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego - Politechnika Koszalińska, str. 195-202, Koszalin 2004.
- [16] Cichosz P., Krawiec S., Kuzinovski M., Żebrowski H.: Wpływ zużycia czopa i panewki na chropowatość eksploatacyjnej warstwy wierzchniej. Zagadnienia inżynierii powierzchni w obróbce skrawaniem. Inżynieria powierzchni '99. Międzynarodowe sympozjum. Wrocław-Szklarska Poręba, 7-9.06.1999. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999, str. 71-82.
- [17] Cichosz P., Krawiec S., Szymkowski J., Żebrowski H.: Pomiar i analiza udziału nośnego współpracujących powierzchni podczas ich docierania się. VIII Konferencja nt. „Metrologia w technikach wytwarzania maszyn – Szczecin'99”. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1999, str. 227-234.
- [18] Dae K.B., Tae J.K., Hee S.K.: Optimalization of feedrate in a face milling operation using a surface roughness model. International Journal of Machine Tools & Manufacturing, 41/2001, str. 451-462.
- [19] Davis E.J., Stout K.J.: Stylus measurement techniques: A contribution to the problem of parametr variation. Wear 83/1982, str.49-60.
- [20] De Chiffre, Christiansen S., Skade S.: Advantages and Industrial Applications of Three-Dimensional Surface Roughness Analysis. Annals of CIRP Vol.43/1/1994
- [21] Dong P.W., Sullivan P.J., Stout K.J.: The significance of surface features in characterising 2D and 3D surface topography. Engineered Surfaces, ASME, PED 62/1992, str. 1-15.
- [22] Dong P.W., Sullivan P.J., Stout K.J.: Comprehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography, cz.I. Wear 159/1992, str.161-171.
- [23] Dong P.W., Sullivan P.J., Stout K.J.: Comprehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography, cz.II. Wear 167/1993, str.9-21.
- [24] Ehmann K.F., Hong M.S.: A generalised model of the surface generation process in metal cutting. Annals of the CIRP, 43/1 (1994), str. 483–486.
- [25] Ehmann K.F.: Machining process modeling: A review. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 119/1997, str. 655-663.
- [26] Elsharkawy M.: Einfluß des Ecken- und Schneidkantenradius auf die Oberflächengüte beim Feindreihen. Fertigungs und Betrieb, 25/1975, str. 23-233.
- [27] Evans C.J., Bryan J.B.: Structured, textured or engineered surface. Ann. CIRP, 48/2/1999.
- [28] Fengfeng X, Zhou D.: Modeling surface roughness in the stone polishing process. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45/2005, str. 365-372.
- [29] Franco P., Estrems M., Faura F.: Influence of radial and axial run outs on surface roughness in face milling with round insert cutting tools. International Journal of Machine Tools & Manufacturing, 44/2004, str. 1555-1565.

- [30] Gadelmawla E.S., Koura M.M., Maksoud T.M., Elewa L.M., Soliman H.H.: Roughness parameters. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 123/2002, str.133-145.
- [31] Gorjala G.B., Rajurkar K.P., Jain V.K.: Computer modelling and graphical simulation of ECM tool design. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME*, 19/1991, str. 121-127.
- [32] Górecka R., Polański Z.: *Metrologia warstwy wierzchniej*. WNT, Warszawa 1983.
- [33] Greń J.: *Statystyka matematyczna. Modele i zadania*. PWN, Warszawa 1975.
- [34] Griffiths B.: *Manufacturing surface technology. Surface Integrity & Functional Performance*. Penton Press, London 2001.
- [35] Grzesik W.: *Postawy skrawania materiałów metalowych*. WNT, Warszawa 1999.
- [36] Handzel – Powierża Z., Klimczak T., Batroszewicz A., Polijaniuk A.: Próba analizy różnic między rozkładem amplitudy mikrogeometrii powierzchni w ujęciu dwuwymiarowym i trójwymiarowym. *Materiały Konferencji: Metrologiczne problemy w technikach wytwarzania*. Wydawnictwo Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Koszalinie. Koszalin – Mielno 1991, str.126-135.
- [37] Hasegawa M., Seireg A., Lindberg R.A.: Surface roughness model for turning. *Tribology international*, 9/1976, str. 285-289.
- [38] Hong M.S., Ehmann K.F.: Generation of engineered surfaces by the surface-shaping system. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 35/1995, str. 1269-1290.
- [39] Jabłoński J.: Digital generation of surface of asymmetrical height distribution. *Measurement* 34/2003, str. 187-191.
- [40] Jahn R., Truckenbrodt H.: A simple fractal analysis method of the surface roughness. *Journal of Materials Processing Technology*, 145/2004, str. 40-45.
- [41] Jain R.K., Jain V.K.: Simulation of surface generated in abrasive flow machining process. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 15/1999, str. 403-412.
- [42] Jakubiec W., Malinowski J.: *Metrologia wielkości geometrycznych*. WNT, Warszawa 2004.
- [43] Jiunn-Jong W.: Simulation of rough surfaces with FFT. *Tribology International*, 33/2000, str. 47-58.
- [44] Kaczmarek J.: *Podstawy obróbki wiórowej, ścierniej i erozyjnej*. WNT, Warszawa 1970.
- [45] Kaczmarek J.: Technologiczne możliwości osiągnięcia gładkości powierzchni. *Mechanika* 4/1961, str. 1-10.
- [46] Kaczmarek J.: Zastosowanie metody SCGC do oceny technologii i prognozy użytkowania powierzchni obrabianych skrawaniem. *Zagadnienia inżynierii powierzchni w obróbce skrawaniem. Inżynieria powierzchni '99. Międzynarodowe sympozjum. Wrocław-Szklarska Poręba, 7-9.06.1999*, str. 95-100.
- [47] Kelly K., Young P., Byrne G.: Modelling the influence of machining dynamics on surface topography in turning. *International Journal of Mechanical Sciences*, 41/1999, str. 507-526.
- [48] Kolaritis F.M., DeVries W.: A model of geometry of the surface generated in end milling with variable process inputs. *Mechanics of deburring and surface finishing processes. ASME PED-38*, 1989, str. 63-78.

- [49] Kolesnikov A., Lyssenko V., Astashenkov A.: The problems of 3 - dimensional approximation of topography and filtering noises in metrology of quality surfaces. X International Colloquium on Surfaces. University of Technology, Chemnitz, Germany 2000, str.523-528.
- [50] Koshy P., Ives L.K., Jahanmir S.: Simulation of diamond-ground surfaces. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 39/1999, str. 1451-1470.
- [51] Kovacevic R.: Surface texture in abrasive water jet cutting. Journal of Manufacturing Systems, 10/1991, str. 32-40.
- [52] Kowalski M., Szymkowski J., Żebrowski H.: Pomiary i analiza chropowatości powierzchni 2D i 3D z zastosowaniem profilografometru Form Talysurf 120L z unowocześnionym oprogramowaniem. Metrologia w technikach wytwarzania maszyn. IX Konferencja naukowo-techniczna. Częstochowa-Kule, 17-19 września 2001. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001, str. 251-260.
- [53] Kowalski M., Żebrowski H.: Znaczenie stereometrycznej charakterystyki powierzchni obrabianej dla kompleksowej oceny technologicznej warstwy wierzchniej. Prace Naukowe ITMiA PWr. nr71/1998. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998, str. 157-162.
- [54] Kozak J., Chuchro M., Ruszaj A., Karbowski K.: The computer aided simulation of electrochemical process with universal spherical electrodes when machining sculptured surfaces. Journal of Materials Processing Technology, 107/2000, str. 283-287.
- [55] Królikowski J., Steckiewicz C.: Matematyka. Wzory, definicje tablice. WNT, Warszawa 1970.
- [56] Kuzinovski M., Pavlovski V., Żebrowski H., Cichosz P.: The investigation of the influence of the cutting edge wear on the changes of the height roughness parameters after turning with ceramic cutting inserts, National Conference on Tribology „TRIBOLOGIA'94”, 7-8 October 1994, Sofia Technical University 1994, str. 49-56.
- [57] Kuzinovski M., Stamboliska Z., Cichosz P.: Engineering of surface layer in material removal machining. Journal of Materials Processing Technology, 155-156/2004, str. 1451-1458.
- [58] Lai W.T., Cheng H.S.: Computer simulation of elastic rough contacts. ASLE Transactions, 28/1985, str. 172-180.
- [59] Lin T.Y., Lu S.H., Stout K.J.: Model-based topography characterization of machined surfaces in three dimensions. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 35/1995, str. 239-245.
- [60] Lipski J., Nieszczeta W., Warmiński J., Zaleski K.: Wpływ nierówności powierzchni obrabianej na siły skrawania i chropowatość powierzchni po toczeniu. III Ogólnokrajowa Konferencja Naukowo – Techniczna. Postępy w technice wytwarzania maszyn. Wydawnictwo Politechnika Krakowska, Kraków, 14 – 15 października 1999, str. 153-160.
- [61] Liubimov V., Łabudzki R.: Badania struktury geometrycznej powierzchni w procesie cięcia strugą wodno-ścierną. Konferencja Naukowo-Techniczna, Metrologia w technikach wytwarzania. Wydawnictwo Politechnika Krakowska, Kraków, 25-27 września 2003, str. 363-368,
- [62] Liubimov V., Oczóś K.E.: Składowa zdeterminowana struktur geometrycznych powierzchni (SGP) o charakterze mieszanym. „Zagadnienia inżynierii powierzchni w obróbce skrawaniem”. Materiały Międzynarodowego Sympozjum „Inżynieria Powierzchni'99”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999, str. 125-134.

- [63] Malburg M.C., Raja J.: Characterization of surface texture generated by plateau-honing process. *CIRP Annals*, 42/1/1993, str. 637-640.
- [64] Martellotti M.E.: An analysis of the milling process. *Trans. ASME*, 67(1)/1941, str. 233-251.
- [65] Miko E., Rusek P., Skrzypiński A.: Eksperymentalna weryfikacja modeli konstytuowania chropowatości powierzchni toczonych. Komisja Technologii Budowy Maszyn PAN oddział Poznań. *Archiwum Technologii Budowy Maszyn*, 8/1990, str. 454-459.
- [66] Miko E., Rusek P., Skrzypiński A.: Modelowanie chropowatości powierzchni konstytuowanej w procesie toczenia. Komisja Technologii Budowy Maszyn PAN oddział Poznań. *Archiwum Technologii Budowy Maszyn*, 8/1990, str. 443-451.
- [67] Miko E.: Model konstytuowania mikronierówności powierzchni toczonych wzdłużnie nożami jednokrawędziowymi. III Międzynarodowa Konferencja N.-T. Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej WW'96, Gorzów Wlkp. – Lubniewice, 16-18 października 1996. *Studia i Materiały-Institut Badań i Ekspertyz Naukowych*, Gorzów Wlkp, str.67-70.
- [68] Miko E.: Modelowanie konstytuowania chropowatości powierzchni frezowanej walcowo. *Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń*, 19/3/1995, str. 51-67.
- [69] Miko E.: Modelowanie konstytuowania mikronierówności powierzchni frezowanych czołowo ostrzami o ściętym narożu. Zebranie Sekcji Podstaw Technologii Maszyn PAN, Prace Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1997, str. 57-68.
- [70] Mrozek B., Mrozek Z., MATLAB – uniwersalne środowisko do obliczeń naukowo-technicznych. Wydawnictwo NACOM, Warszawa 1996.
- [71] Nayak P.R.: Random process model of rough surfaces. *Transactions of ACME, Journal of Lubrication Technology*, 93/1971, str. 398-407.
- [72] Nowicki B, Stefko A., Szulc S.: Obróbka powierzchniowa. Nadawanie częściom maszyn właściwości eksploatacyjnych. WNT, Warszawa 1970.
- [73] Nowicki B.: Kierunki rozwoju metrologii struktury geometrycznej powierzchni. III Międzynarodowa Konferencja N.-T. Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej WW'96, Gorzów Wlkp. – Lubniewice, 16-18 października 1996. *Studia i Materiały-Institut Badań i Ekspertyz Naukowych*, Gorzów Wlkp, str.45-54.
- [74] Nowicki B.: Struktura geometryczna. Chropowatość i falistość powierzchni. WNT, Warszawa 1991.
- [75] Oczóś K.E., Liubimov V.: Struktura geometryczna powierzchni. Podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowanych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2003.
- [76] Oczóś K.E., Liubimov.V.: Analiza w układzie 3D struktury geometrycznej powierzchni szlifowanych. Materiały Konferencji: XXI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Warszawa – Miedzeszyn, 9-12 września 1998. Sekcja Podstaw Technologii KBM PAN, Zakład Obróbek Wykańczających i Erozyjnych Instytutu Technologii Maszyn Politechnika Warszawska, Warszawa, str.116-122.
- [77] Oczóś K.E., Liubimov V.: Klasyfikacja struktur geometrycznych powierzchni (SGP). „Zagadnienia inżynierii powierzchni w obróbce skrawaniem”. Materiały Międzynarodowego Sympozjum „Inżynieria Powierzchni'99”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999, str. 149-154.
- [78] Oczóś K.E., Porzycki J.: Szlifowanie. WNT, Warszawa 1990.

- [79] Paris H., Peigne G., Mayer R.: Surface shape prediction in high speed milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44/2004, str. 1567-1576.
- [80] Patrikar R.J.: Modelling and simulation of surface roughness. *Applied Surface Science*, 228/2004, str. 213-220.
- [81] Patrikar R.J.: Dong C.Y., Zhuang W.: Modelling interconnects surface roughness. *Microelectronics Journal*, 33/2002, str. 929-934.
- [82] Pawlus P., Michalski J.: Modelowanie komputerowe topografii powierzchni cylindrów po gładzeniu, XXV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, 11-14.09.2002, Wrocław – Duszniki Zdrój. Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002, str. 261-266.
- [83] Pawlus P.: Struktura geometryczna powierzchni cylindrów podczas eksploatacji silnika spalinowego. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1999.
- [84] PN-87/M-04256/01;02;03;04. Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość powierzchni. Pomiary chropowatości. Terminologia Ogólna
- [85] PN-EN ISO 4287:1999. Specyfikacje geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- [86] PN-ISO-3274:1997. Specyfikacje geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Charakterystyki nominalne przyrządów stykowych (z ostrzem odwzorowującym).
- [87] Raja J., Radhakrishnan V.: Digital filtering of surface profiles. *Wear* (1979), 57, str.147-155.
- [88] Ramasawmy H., Blunt L.: 3D surface topography assessment of the effect of different electrolytes during electrochemical polishing of EDM surfaces. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42/2002, str. 567-574.
- [89] Rosen B.-G., Craford R.: Interactive surface modelling: Model of a function-oriented expert system for specification of surface properties. *Industrial Metrology*, 2/2/1992, str. 107-119.
- [90] Rosen B.-G., Ohlsson R., Westberg J.: Interactive surface modelling, an implementation of an expert system for specification of surface roughness and topography. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 35/1995, str. 317-324.
- [91] Sate T.: Surface finish in metal cutting. *Annals of the CIRP*, 4/1964.
- [92] Scott P.J.: Surface metrology, a new philosophical approach. *Wear*, 109/1986, str. 267-274.
- [93] Smith G.: *Industrial metrology. Surfaces and roundness*. Springer-Verlag, London 2002.
- [94] Stout K.J., Blunt L.: A contribution to the debate on surface classifications – random, systematic, unstructured, structured and engineering. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 41/2001, str.2039-2044.
- [95] Sutherland J.W., DeVor R.E.: An improved method for cutting force and surface error prediction in flexible end milling systems. *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, 108/1986, str.269-279.
- [96] Takeda M., Mutoh K.: Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes. *Applied Optics*, 22/1983, str. 3977-3982.

- [97] Tomasiak J., Rudziński R.: Wybrane problemy w pomiarach mikrogeometrii powierzchni. VI Sympozjum Klubu PF ISO 9000, Politechnika Świętokrzyska. Kielce, 16-18.10.2000.
- [98] Tricarico C., Delpretti R., Dauw D.F.: Geometrical simulation of the EDM die-sinking process. *Annals of the CIRP*, 37/1/1988, str. 191-196.
- [99] Tsai K.M., Wang P.J.: Predictions on surface finish in electrical discharge machining based upon neural network models. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 41/2001, str. 1385-1403.
- [100] Valentinčič J., Junkar M.: A model for detection of the eroding surface based on discharge parameters. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44/2004, str. 175-181.
- [101] Vikram G., Ramesh Babu N.: Modelling and analysis of abrasive water jet cut surface topography. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42/2002, str. 1345-1354.
- [102] Weinert K., Schneider M.: Simulation of tool – grinding with finite element method. *Annals of the CIRP*, 49/1 (2000), str. 253–256.
- [103] Wiącek M., Kowalski M., Miernik M.: Ocena przydatności wymiaru fraktalnego do opisu chropowatości powierzchni po obróbkach ściernych. XXV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej. Wrocław-Duszniki Zdrój, 11-14 września 2002. Instytut Technologii Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002, str. 329-336.
- [104] Wiącek M.: Przydatność analizy fraktalnej do oceny stanu geometrycznego powierzchni obrobionej. Praca doktorska. Wrocław 2004.
- [105] Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J.: Nowe kierunki w pomiarach chropowatości powierzchni. „Zagadnienia inżynierii powierzchni w obróbce skrawaniem”. Materiały Międzynarodowego Sympozjum „Inżynieria Powierzchni'99”, str. 205-212. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- [106] Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J.: Przewodnik po pomiarach nierówności powierzchni czyli o chropowatości i nie tylko. Zakład Poligraficzno – Wydawniczy M – Druk. Poznań 2003.
- [107] Wieczorowski M., Cellary A.: Nowoczesne, stykowe i bezstykowe metody pomiarów stereometrii powierzchni. VI Sympozjum Klubu PF ISO 9000, Politechnika Świętokrzyska. Kielce, 16-18.10.2000.
- [108] Wieczorowski M.: Parametry oceny topografii powierzchni w porównaniu z oceną dwuwymiarową. „Zagadnienia inżynierii powierzchni w obróbce skrawaniem”. Materiały Międzynarodowego Sympozjum „Inżynieria Powierzchni'99”, str. 205-212. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- [109] Wieczorowski M.: Stereometryczna ocena porównawcza powierzchni przy zastosowaniu różnych układów odniesienia profilometrów. Praca doktorska. Poznań 1997.
- [110] Zaleski K.: Kształtowanie chropowatości powierzchni w procesie nagniatania dynamicznego. III Ogólnokrajowa konferencja naukowo-techniczna. Postępy w technice wytwarzania maszyn. Politechnika Krakowska, Kraków, 14-15 października 1999, str. 291-298.
- [111] Zalewski A., Cegiela R., MATLAB – obliczenia numeryczne i ich zastosowania. Wydawnictwo PLJ, Poznań 1996.

- [112] Zhang B., Uematsu T.: Surface generation mechanism in helical scan grinding: an analytical study. *Journal of Materials Processing Technology* 91/1999, str.206-214.
- [113] Zhang G.M., Yerramareddy S., Lee S.M., Lu S. C.-Y.: Simulation of surface topography formed during the intermittent turning processes. *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 113/1991, str. 273-279.
- [114] Zhou G.Y., Leu M.C., Dong S.X.: Measurement and assessment of topography of machined surfaces. *ASME, PED* 46/1990, str. 89-100.
- [115] Zhou G.Y., Leu M.C., Geskin E., Chung Y., Chao J.: Investigation of topography of waterjet generated surfaces. *Engineered Surfaces, ASME, PED* 62/1992, str. 191-202.
- [116] Zhou X., Xi F.: Modeling and predicting surface roughness of the grinding process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42/2002, str. 969-977.
- [117] Żebrowski H. i inni: Techniki wytwarzania. Obróbka wiórowa, ścierna, erozyjna. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
- [118] Żebrowski H., Kowalski M., Pomiary chropowości i stereometryczny opis struktury powierzchni gładzonych. Zagadnienia inżynierii powierzchni w obróbce skrawaniem – Inżynieria powierzchni '99, Międzynarodowe sympozjum, Wrocław–Szklarska Poręba, 7–9.06.1999. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999, str.227-234.
- [119] Żebrowski H., Kowalski M.: Ocena zmian wybranych parametrów chropowości i krzywych udziału nośnego (2D,3D) powierzchni toczonej a następnie dogładzanej oscylacyjnie. 4-ta międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna pt. Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej - WW 99. Gorzów Wlkp.-Lubniewice, 21-22 października 1999. Studia i Materiały-Institut Badań i Ekspertyz Naukowych Gorzów Wlkp. Gorzów Wlkp. 1999, str. 37-44.
- [120] Żebrowski H., Kowalski M.: Pomiary i analiza stereometryczna (3D) powierzchni po obróbce strumieniowo-ścierniej. Zagadnienia inżynierii powierzchni w obróbce skrawaniem. Inżynieria powierzchni '99. Międzynarodowe sympozjum. Wrocław-Szklarska Poręba, 7-9.06.1999. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999, str. 235-242.