chropowatość powierzchni, topografia, filtracja, próbkowanie

Michał WIECZOROWSKI¹

TEORETYCZNE PODSTAWY PRZESTRZENNEJ ANALIZY NIERÓWNOŚCI POWIERZCHNI

Każdy przedmiot materialny występujący w otoczeniu człowieka jest ograniczony powierzchniami. Każda taka powierzchnia z kolei cechuje się pewnymi nierównościami, które na niej występują i są nieodłączną cechą wszystkiego, czego możemy dotknąć, co możemy poznać czy zaobserwować. Ich charakteryzacja jest bardzo istotnym zagadnieniem, ponieważ pozwala oceniać określone powierzchnie pod kątem ich jakości i funkcjonalności. W artykule przedstawiono podstawy przestrzennej analizy nierówności powierzchni. Zaprezentowano podstawowe rodzaje nierówności, omówiono sposób doboru odcinka próbkowania i dobór elementu nominalnego. Pokazano zasadnicze metody filtracji uwzględniając najnowsze osiągnięcia w tym zakresie, jak np. przycinanie Wolfa. Przedstawiono parametry obliczane z danych topograficznych z ich podziałem na parametry związane z obszarem i cechami oraz zależnościami służącymi do wyznaczania wartości.

1. WPROWADZENIE

Opisanie każdej powierzchni, w sposób nie budzący wątpliwości osoby analizującej, wymaga przyjęcia i zdefiniowania pewnych pojęć. Język metrologii powierzchni pozwala opisać nierówności powierzchni – czyli całość odstępstw powierzchni rzeczywistej od powierzchni nominalnej – w sposób jednolity i zrozumiały dla wszystkich. Powierzchnia rzeczywista jest tu tym, co oddziela przedmiot od świata zewnętrznego, a nominalna jest tworem geometrycznie idealnym o kształcie określonym w dokumentacji technicznej. Niestety pierwsza z nich jest niemożliwa do zmierzenia, a druga niemożliwa do osiągnięcia, przez co pozostaje nam zająć się powierzchnią zmierzoną, czyli zaobserwowaną przy pomocy konkretnej, zastosowanej metody pomiarowej. Wszystkie te trzy powierzchnie różnią się między sobą co wynika zarówno z możliwości wytwórczych jak i z faktu, że – zwłaszcza w przyrządach stykowych – odwzorowujemy zaledwie obwiednię analizowanej powierzchni. Natomiast w metodach bezstykowych, zależnie od zasady fizycznej, na której konkretne przyrządy zostały zbudowane, zdarza się, że wyniki są uzależnione od właściwości fizycznych powierzchni zwłaszcza dla materiałów, dla których duża część

¹ Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechanicznej, Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych E-mail: michal.wieczorowski@put.poznan.pl

światła padającego wchodzi w głąb materiału. Wtedy uwzględniając to, że światło ma dwoistą naturę korpuskularno falową, a jego cząsteczki dotykają powierzchni wchodząc z nią w interakcję nasuwa się filozoficzne pytanie jak bardzo bezstykowe są te metody.

2. ANALIZA NIERÓWNOŚCI WYSTĘPUJĄCYCH NA POWIERZCHNI

Topografia powierzchni potocznie pojmowana jest jako zbiór szczegółowych cech trójwymiarowych pewnego ograniczonego obszaru geometrii powierzchni. Pomiary chropowatości 3D wykorzystywane są nie tylko dlatego, że przestrzenny obraz pozwala lepiej zrozumieć naturę powierzchni. Większość interakcji powierzchni, włączając wszelkie zagadnienia kontaktu dwóch powierzchni, to zjawiska trójwymiarowe i taką właśnie mają naturę. Ich opis nie może zatem ograniczać się jedynie do analizy profilu. Problem pojawia się szczególnie, kiedy mamy do czynienia ze zjawiskami kontaktu. Na przykład w większości zagadnień budowy maszyn obszar rzeczywistego kontaktu pomiędzy dwoma powierzchniami nie przekracza zaledwie 1% ich powierzchni nominalnej. W takim przypadku pomiar profilu może albo zaniżyć wysokości nierówności, albo w ogóle nie objąć tych najistotniejszych i konieczność podejścia 3D staje się bezsporna.

Część terminologii związanej z topografią powierzchni została zaczerpnięta z dwuwymiarowego opisu chropowatości. W przypadku opisu 3D podstawową zmianą jest matematyczne określenie powierzchni poprzez równanie dwóch zmiennych: z(x,y). Równanie to dla opisu 2D było jedynie domyślnym, a wszystkie obliczenia sprowadzały się do przekroju. Powierzchnia określana tym równaniem jest granicą, która oddziela obiekt od innego obiektu, substancji lub powierzchni. Warto zaznaczyć, że przyjmuje się - jako tłumaczenia z języka angielskiego - następujące określenia związane z pomiarami nierówności powierzchni w aspekcie 2D i 3D: pomiary 3D odnoszą się do powierzchni i określa się je pomiarami topografii, pomiarami stereometrii lub stereometrycznymi, natomiast pomiary 2D odnoszą się do profilu i określa się je pomiarami nierówności profilu. Zarówno jednak jedne jak i drugie określa się często pomiarami chropowatości, co jest pewnym uproszczeniem, ponieważ chropowatość dalej określa się jako zbiór najmniejszych powierzchni o stosunkowo małym odstępie, zazwyczaj nierówności zawierający nierówności będące wynikiem specyfiki procesu produkcyjnego z wyłączeniem falistości i błędu kształtu (rys. 1). Chropowatość nadal jest więc terminem umownym i należy zdawać sobie sprawę, że to, co dla jednej powierzchni jest chropowatością, dla innej może być falistością lub błędem kształtu. Falistość jest natomiast składnikiem geometrycznej struktury powierzchni o większym odstępie nierówności na który nakłada się chropowatość.

Powierzchnia nominalna, czyli powierzchnia wynikająca z projektu, rysunków lub dokumentacji nie uwzględnia błędów kształtu, chropowatości i falistości, a w ujęciu 3D może być powierzchnią płaską albo zakrzywioną. Powierzchnia zmierzona jest to reprezentacja powierzchni uzyskana za pomocą przyrządu. Topografią powierzchni – stricte zgodnie z definicją - nazywa się ogólny geometryczny opis jej nierówności będących odstępstwami od powierzchni nominalnej, natomiast przez strukturę geometryczną powierzchni określa się powtarzające lub losowe odstępstwa od powierzchni nominalnej, które tworzą trójwymiarową topografię powierzchni. Te dwa terminy są bardzo do siebie zbliżone i przez wielu badaczy stosowane zamiennie. W praktyce czasami jako wygodne rozróżnienie przyjmuje się określanie topografii jako "tego co mierzymy" a struktury geometrycznej jako "tego co jest w rzeczywistości". Kierunkowa struktura powierzchni – najpowszechniej występujący układ elementów i cech topografii.



Rys. 1. Podstawowe elementy struktury geometrycznej powierzchni Fig. 1. Basic elements of surface geometric structure

Na każdej powierzchni mogą występować elementy topograficzne (rys. 2):

- * szczyt (summit) najwyższy punkt nierówności w ramach pewnego obszaru,
- * wgłębienie (pit) niewielka depresja nierówności powierzchni,
- * dolina (valley) długa depresja nierówności powierzchni,
- * grzbiet (ridge) długie wzniesienie nierówności powierzchni,
- * rów (trough) długa i wąska depresja nierówności powierzchni.

W tej terminologii rozróżnia się określenia: szczyt i wierzchołek, a ten drugi termin rezerwowany jest wyłącznie dla opisu dwuwymiarowego.

Kolejne pojęcie to powierzchnia odniesienia, w stosunku do której obliczane są parametry topografii. Jest ona definiowana jako powierzchnia o kształcie i położeniu powierzchni nominalnej, zgodnie z ogólnym ułożeniem rzeczywistej powierzchni w przestrzeni. Powierzchnią powstałą po odjęciu powierzchni odniesienia od powierzchni rzeczywistej nazywa się powierzchnią resztkową $\eta(x,y)$ i jej właśnie dotyczy liczbowa ocena topografii.



Rys. 2. Elementy topograficzne powierzchni Fig. 2. Topographic elements of surface

Najlepszą powierzchnią odniesienia dla przedmiotów płaskich jest płaszczyzna najmniejszych kwadratów, a dla zakrzywionych powierzchnia określona wielomianem drugiego stopnia. Powierzchnia średnia najmniejszych kwadratów jest zatem powierzchnią odniesienia o kształcie powierzchni nominalnej, dzieląca powierzchnię zmierzoną tak, że suma kwadratów odległości pomiędzy tymi powierzchniami ma wartość minimalną. W stosunku do powierzchni określa się przekroje:

- normalny prostopadle do powierzchni odniesienia,
- ukośny nachylony w stosunku do powierzchni odniesienia,
- równoodległy przecięcie powierzchni rzeczywistej powierzchnią mającą kształt nominalny i równo oddaloną od powierzchni odniesienia.

Suma powierzchni kontaktu uzyskanych poprzez odcięcie topografii powierzchni poprzez przekrój równoodległy nazywana jest powierzchnią nośną. Przekrój ten dzieli topografię na materiał i pustki tak, że objętość materiału jest objętością nieregularności topografii zawartą pod powierzchnią rzeczywistą i powyżej przekroju równoodległego. Natomiast objętość pustek to objętość medium zawartego poniżej przekroju równoodległego i powyżej powierzchni rzeczywistej. Przekroje równoodległe pozwalają też tworzyć opisywany już obraz konturowy powierzchni, czyli całość linii przecięcia powierzchni rzeczywistej poprzez określoną liczbę przekrojów równoodległych.

Terminologia związana z warunkami pomiaru opiera się przede wszystkim na próbkowaniu. Jest ono na ogół próbkowaniem równoodległym ($\Delta x = \Delta y$ czyli odstępy próbkowania w obu kierunkach są jednakowe). Odstęp próbkowania to odstęp pomiędzy dwoma sasiednimi punktami w kierunku x lub y. Zakłada się ponadto, że wartości Δx i Δy sa stałe dla całego obszaru próbkowania, choć nie jest to wymogiem niezbędnym. Jeżeli macierz punktów próbkowania składa się z M punktów w kierunku x (przesuw wzdłużny głowicy) i N punktów w kierunku y (poprzecznie), to obszar próbkowania ma wielkość $(M-1)\Delta x * (N-1)\Delta y$. Obszar ograniczony przez odcinki łączące cztery sąsiednie punkty próbkowania nazwano obszarem wydzielonym. Wyróżnia się ponadto termin obszar obliczeniowy określany jako obszar, na którym dokonywana jest ocena topografii. W przeciwieństwie więc do pomiarów 2D, gdzie jeden odcinek pomiarowy zawiera najczęściej kilka odcinków elementarnych, w ocenie 3D obszar obliczeniowy będący jednocześnie obszarem pomiarowym zawiera tylko jeden obszar próbkowania. Poczyniono też założenia odnośnie liczby punktów próbkowania: zarówno M jak N powinny być potęgami liczby 2. Dla powierzchni izotropowych należy przyjąć M=N, dla pozostałych spełnienie tego warunku nie jest konieczne. Najmniejsza dopuszczalna wartość M wynosi 128 punktów a dla N wynosi 32. Zalecane wielkości macierzy próbkowania przedstawiono w tabeli 1, a zalecenia odnośnie odcinka próbkowania w tabeli 2. Litera A oznacza powierzchnię anizotropową a I izotropową.

Podobnie jak M i N tak i odstępy próbkowania dla powierzchni izotropowych powinny być sobie równe. Ich wartości powinny zostać przyjęte z ciągu 1, 2, 5, 10, ..., przy czym w zależności od wysokości nierówności można przyjąć różne jednostki (nm, µm lub nawet mm). Na tej podstawie określa się długość boku obszaru próbkowania, która może wynosić od 0,032 do 512mm. Przybliżone wartości długości boku obszaru próbkowania pokazano w tabeli 3.

	Ν					
М		$2^{7}=128$	$2^8 = 256$	$2^9 = 512$	$2^{10} = 1024$	
	$2^{5}=32$	А	А	А	А	
	$2^{6}=64$	А	А	А	А	
	$2^{7}=128$	A+I	А	А	А	
	$2^8 = 256$	А	A+I	А	А	
	$2^9 = 512$	А	А	A+I	А	
	$2^{10} = 1024$	А	А	А	A+I	

Tabela 1. Zalecane wielkości macierzy próbkowania Table 1. Recommended sizes of sampling area

Tabela 2. Zalecenia odnośnie odcinka próbkowania Table 2. Recommendations regarding sampling length

	$\Delta x [nm, \mu m]$									
		1	2	5	10	20	50	100	200	500
Δy [nm, μm, mm]	1	A+I								
	2	А	A+I							
	5	А	А	A+I						
	10	А	А	А	A+I					
	20	А	А	А	А	A+I				
	50	А	А	А	А	А	A+I			
	100	А	А	А	Α	А	Α	A+I		
	200	А	А	А	А	А	А	А	A+I	
	500	Α	Α	Α	Α	Α	Α	Α	Α	A+I

Tabela 3. Przybliżone wartości długości boku obszaru próbkowania w mm Table 3. Approximate values of side of sampling area

Odstęp	Liczba punktów danych							
próbkowania	$2^{5}=32$	$2^{6}=64$	$2^{7}=128$	$2^8 = 256$	$2^9 = 512$	$2^{10} = 1024$		
[nm, µm]								
1	0,032	0,064	0,128	0,256	0,512	1,024		
2	0,064	0,128	0,256	0,512	1,024	2,048		
5	0,16	0,32	0,64	1,28	2,56	5,12		
10	0,32	0,64	1,28	2,56	5,12	10,24		
20	0,64	1,28	2,56	5,12	10,24	20,48		
50	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6	51,2		
100	3,2	6,4	12,8	25,6	51,2	102,4		
200	6,4	12,8	25,6	51,2	102,4	204,8		
500	16	32	64	128	256	512		

Pierwszym krokiem po zebraniu danych z powierzchni jest wybranie odpowiedniego elementu odniesienia. Niektóre z możliwych do zastosowania elementów odniesienia zostały przeniesione z układu dwuwymiarowego, inne zostały stworzone wyłącznie z myślą o topografii. Pierwsze próby określenia różnych funkcji jako elementy odniesienia do topografii powierzchni przedstawiono w pracy [1], a szczegółowy opis elementów odniesienia stosowanych przy pomiarach nierówności na powierzchniach płaskich i krzywoliniowych można znaleźć w publikacji [2]. Przyjęto kilka kryteriów zalecanych dla elementu odniesienia, a mianowicie:

- Określenie kierunku normalnego. Powinien on mieć geometryczny kształt powierzchni, którą odzwierciedla ten sam kierunek normalny. Innymi słowy musi on mieć możliwość poziomowania lub usuwania krzywizn powierzchni rzeczywistej.
- Opis matematyczny. Element odniesienia musi być opisywalny matematycznie w celach możliwie najwygodniejszego przetwarzania numerycznego. Elementy odniesienia dla powierzchni zakrzywionych, takie jak powierzchnie kuliste i walcowe opisywane są więc równaniami wyższego rzędu i powinny mieć podobne właściwości jak odpowiadające im powierzchnie rzeczywiste.
- Efektywność obliczeniowa. Czas obliczania elementu odniesienia musi być możliwie krótki, tolerowalny z punktu widzenia użytkownika.

Uwzględniając powyższe kryteria można wyróżnić szereg potencjalnych elementów odniesienia. Dla elementów płaskich może to być m.in. płaszczyzna średnia obliczona metodą najmniejszych kwadratów, płaszczyzna średnia wyznaczana poprzez pojedyncze linie odniesienia, płaszczyzna obwiedni, płaszczyzna minimalna (stosowana do oceny błędów kształtu), filtracja cyfrowa, funkcjonalny element odniesienia (np. rozszerzenie metody motywów do przestrzeni trójwymiarowej), czy inne metody wykorzystujące np. funkcje sklejane, analizę tensorową lub metodę elementów skończonych. Biorąc pod uwagę kryteria doboru płaszczyzny odniesienia oraz powszechność stosowania najlepszym rozwiązaniem jest pierwsza z wymienionych opcji. Matematycznie definiuje się ją jako płaszczyznę, dla której suma kwadratów odległości punktów od niej jest najmniejsza. Obliczenia są stosunkowo nieskomplikowane, chociaż słabym punktem tej metody jest normalny kierunek płaszczyzny dla powierzchni periodycznych, który zmienia się w zależności od przyjęcia punktu początkowego i liczby uwzględnionych pełnych długości fali. Na szczęście spora część powierzchni w budowie maszyn ma charakter mniej lub bardziej losowy i ten problem nie występuje, a dla pozostałych najprostszym rozwiązaniem jest przyjęcie odpowiednio dużego zbioru punktów próbkowania.

Dla danej powierzchni z(x,y) płaszczyzna odniesienia jest definiowana jako (1):

$$f(x, y) = ax + by + c \tag{1}$$

gdzie *a*, *b*, *c* są współczynnikami kierunkowymi określanymi na podstawie punktów pomiarowych.

.. ..

Suma kwadratów odległości nierówności od płaszczyzny wyraża się równaniem (2):

$$\varepsilon = \sum_{l=1}^{N} \sum_{k=1}^{M} [z(x_k, y_l) - f(x_k, y_l)]^2 \longrightarrow \min$$
(2)

gdzie *M* i *N* oznaczają liczbę punktów próbkowania odpowiednio w kierunku *x* i *y*.

Współczynniki płaszczyzny najmniejszych kwadratów wyznacza się poprzez minimalizację powyższego równania. Dokładniejszym przybliżeniem płaszczyzny średniej jest obliczenie jej jako normalnej płaszczyzny najmniejszych kwadratów [3]. Różnice pomiędzy płaszczyzną najmniejszych kwadratów i normalną płaszczyzną najmniejszych kwadratów zależą od struktury powierzchni, choć przeważnie są stosunkowo nieznaczne. Zdarza się natomiast, że płaszczyzna uzyskana przy pomocy jednej z tych metod w rzeczywistości nie spełnia warunku minimum odległości, a odległości punktów płaszczyzny obliczonej metodą simplex mogą być nawet o około 20% mniejsze niż obliczone metodą najmniejszych kwadratów.

Powyższe algorytmy nadają się do znajdywania elementu odniesienia w postaci płaszczyzny. W praktyce jednak wiele powierzchni w budowie maszyn ma kształty nie będące płaszczyznami, np. powierzchnie otworów, koła zębate, łożyska. W takim przypadku dane pomiarowe odzwierciedlają wycinek powierzchni krzywej i podstawowym zadaniem jest usunięcie krzywizny. Istnieje kilka metod realizacji tego zadania, jak np. zastosowanie prostej bryły geometrycznej jak kula lub walec, wielomianu kwadratowego dwóch zmiennych, wielomianu dwóch zmiennych wyższego rzędu, funkcji sklejanych, elementu nominalnego minimalnego czy filtracji cyfrowej 2D. Problem, która z tych metod jest najlepsza nie zawsze jest oczywisty. Wiadomo jednak, że do większości powierzchni krzywych jako element odniesienia dobrze nadaje się powierzchnia określona wielomianem drugiego stopnia. Składają się na to następujące czynniki:

- a) Zmierzony obszar jest tylko małym fragmentem powierzchni w porównaniu z rozmiarami kuli lub walca i stąd przybliżenie wielomianem jest bardzo dobre.
- b) Powierzchnie nominalnie krzywe mają tendencje do zawierania w sobie błędów kształtu powstałych na skutek niedoskonałości procesu wytwarzania. Z tego powodu nawet na małym obszarze powierzchnie rzeczywiste tracą na ogół swój kulisty lub walcowy charakter i obliczanie elementu odniesienia jako prostej bryły geometrycznej byłoby przybliżeniem. Ponadto parametry tych brył takie jak np. promień kuli czy walca mogą okazać się dalekie od ich faktycznych wartości.
- c) Algorytmy obliczeniowe dla kuli i walca są skomplikowane, wymagające w wielu przypadkach stosowania przybliżeń liniowych. Ponadto przy różnych algorytmach obliczania tego samego elementu odniesienia uzyskuje się często nieporównywalne wyniki.
- d) Wiele powierzchni nominalnie krzywych takich jak np. zęby kół zębatych jest trudnych do opisania za pomocą prostych brył geometrycznych. Wielomian kwadratowy opisuje takie powierzchnie znacznie lepiej.
- e) Złożoność matematyczna funkcji sklejanych jest tak duża, że stosowanie ich jako elementu odniesienia do powierzchni zakrzywionych jest wysoce niepraktyczne.
- f) Wielomian rzędu wyższego niż drugi na ogół nie oferuje lepszych możliwości usuwania krzywizny, jest natomiast bardziej skomplikowany matematycznie.
- g) Element nominalny minimalny określany z metody simplex, Monte Carlo, itp. ma takie same wady, co płaszczyzna minimalna spotęgowane stopniem złożoności obliczeń.

Z powyższej analizy wynika, że najkorzystniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie wielomianu drugiego stopnia dwóch zmiennych określonego za pomocą metody najmniejszych kwadratów. Wielomian kwadratowy można opisać funkcją (3):

$$f(x, y) = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{20}x^2 + a_{11}xy + a_{02}y^2$$
(3)

a jego współczynniki wyznacza się z odpowiedniego równania macierzowego. Jeśli na powierzchni występują wyraźne wgłębienia lub wierzchołki, to mogą one mieć zasadniczy wpływ na położenie elementu odniesienia. W takich sytuacjach wymagane jest odpowiednie jego dopasowanie, co można uczynić stosując jedną z dwóch metod:

- Zastosowanie dwustopniowego wyznaczania elementu odniesienia. Procedura ta jest analogiczna do wywodzącego się z norm niemieckich sposobu obliczania linii średniej dla powierzchni po honowaniu plateau. W pierwszym kroku usuwa się wszystkie głębokie doliny, następnie dla pozostałej części profilu oblicza się linię średnią i po jej określeniu ponownie dodaje usunięte uprzednio wgłębienia.
- Zastosowanie algorytmu wyznaczania powierzchni najmniejszych kwadratów poprzez metodę współczynników wagowych. Każdy punkt powierzchni odniesienia jest wtedy obliczany biorąc pod uwagę wpływ punktów sąsiadujących.

Powierzchnia wyznaczona w ten sposób pozwala na określenie parametrów w sposób bardziej odpowiedni dla jej funkcjonalnej natury, ale – co należy wyraźnie podkreślić – nie jest już powierzchnią średnią.

Najnowsze pomysły związane z filtracją specyfikują sposób uzyskiwania powierzchni zawierających żądane przez użytkownika składowe nierówności. I tak filtr S to filtr usuwający z powierzchni składowe poziome o małym okresie, natomiast filtr L usuwa składowe poziome o dużym okresie. Z kolei operator F usuwa z powierzchni jej kształt nominalny, inny od płaszczyzny. Powierzchnia S-F to powierzchnia otrzymana z pierwotnej po zastosowaniu operatora F (odseparowaniu kształtu). Powierzchnia S-L to powierzchnia otrzymana z powierzchni S-F po usunięciu składowych o dużym okresie (długofalowych), przy zastosowaniu filtru L. Wiele konkretnych filtrów typu L jest wrażliwych na kształt i wymaga w pierwszym rzędzie zastosowania operatora F. Działanie filtru S w wielu wypadkach sprowadza się do użycia określonego typu przyrządu pomiarowego, którego geometryczne bądź fizyczne uniemożliwiają ograniczenia uzyskanie sygnału o częstotliwości wyższej niż pewna wynikająca z nich granica. Przy profilometrii stykowej opisanej w rozdziale 3 granicę tą stanowią wymiary geometryczne końcówki pomiarowej. Jeśli zatem powierzchnia wynikowa ma zawierać błąd kształtu, to należy wybrać opcję S-F, jeśli nie, to S-L. Schematyczne działanie filtrów S i L oraz operatora F przedstawiono na rysunku 3.

Domyślnymi kształtami powierzchni S-F i S-L są prostokąty. Definicje poszczególnych filtrów są często rozwinięciem tych, które stosuje się do analizy profilu. Można zatem stosować standardowe filtry Gaussa, filtry odporne i morfologiczne, a ich dokładniejszy opis zawarto w pracy [4].

Ważnym zagadnieniem w topograficznej analizie powierzchni jest uwypuklenie jej cech funkcjonalnych. Jedną z możliwości jest tu zastosowanie metody motywów w wersji



Rys. 3. Schematyczne działanie filtrów S i L oraz operatora F Fig. 3. Performance of S and L filters as well as F operator

3D, ale ostatnio dużo bardziej popularne jest zastosowanie drzewa zmian do organizacji zależności pomiędzy krytycznymi punktami wzgórz i wgłębień przy zachowaniu ważnych informacji. Koncepcja takiego drzewa wprowadzona została w pracy [5] jako przykład bardziej ogólnego obiektu topologicznego nazywanego grafem Reeba. W topograficznej analizie powierzchni przedstawia ono relacje pomiędzy liniami konturowymi na powierzchni w ten sposób, że każda linia konturowa zaznaczona jest jako punkt na określonej wysokości, a sąsiednie linie konturowe stają się sąsiednimi punktami na wykresie. Kierunek pionowy reprezentuje wysokość, a wszystkie poszczególne linie konturowe na określonej wysokości reprezentowane są przez punkty o tej właśnie wysokości.



Rys. 4. Mapa konturowa pokazująca krytyczne linie i punkty Fig. 4. Contour map with critical lines and points

Siodła pokazane są jako połączenie dwóch lub więcej gałęzi, wierzchołki i wgłębienia są ich końcami. Jeżeli powierzchnia wyglądać będzie tak, jak przedstawiono to na rysunku 4, to drzewo reprezentować będzie np. proces napełniania dolin cieczą. Punkt, w którym po raz pierwszy wyleje się ona z doliny jest siodłem, które łączone jest z największą głębią doliny. Napełniając dalej otrzymamy kolejne siodło, które znów połączone zostanie z doliną. Odwracając cechy ukształtowania terenu podobny proces pokaże zależności pomiędzy wierzchołkami. W ten sposób drzewo zmian odzwierciedli charakter powiązań między nierównościami.

Występują zasadniczo trzy typy drzew (rys. 5): pełne drzewo reprezentujące relacje pomiędzy punktami krytycznymi wzniesień i wgłębień (po lewej stronie rysunku), drzewo wgłębień reprezentujące relacje pomiędzy dolinami i siodłami (w środku), oraz drzewo wzniesień reprezentujące relacje pomiędzy wierzchołkami i siodłami (po prawej).

W literaturze pojawiły się metody przycinania takich drzew, aby uzyskać z nich bardziej użyteczne informacje.



Rys. 5. Drzewa zmian: pełne (po lewej), wgłębień (środek) i wzniesień (po prawej) Fig. 5. Tree of changes: full (left), valleys (middle) and peaks (right)

W metrologii powierzchni największe zastosowanie wydaje się mieć metoda przycinania Wolfa [6]. Polega ona na znajdowaniu wierzchołka lub wgłębienia o najmniejszej różnicy wysokości w stosunku do przylegającego siodła i łączeniu go z tym siodłem. To samo powtarza się z następnymi wierzchołkami i wgłębieniami aż do uzyskania pewnego progu. Jest nim najczęściej wartość różnicy wysokości, powyżej której drzewa się nie przycina, lub określona pozostająca liczba wierzchołków i wzniesień. Rysunek 6 przedstawia drzewo zmian z lewej strony rys. 5 po przycinaniu Wolfa.

Zastosowanie metody przycinania Wolfa aż zostanie tylko 5 wierzchołków i wgłębień pozwala na uzyskanie stabilnej, choć mocno zmodyfikowanej definicji parametru Sz, zwanej wysokością dziesięciopunktową i oznaczanej S10z, opisanej w kolejnym podrozdziale. Wierzchołki uzyskane w ten sposób mogą nie być bezwzględnie najwyższe na powierzchni, ale będą mieć największe wysokości względne, czyli liczone od swojej podstawy.



Rys. 6. Drzewo zmian po przycinaniu Wolfa Fig. 6. Tree of changes after Wolf pruning

Kolejnym krokiem analizy po zebraniu danych pomiarowych i określeniu elementu odniesienia jest przedstawianie powierzchni w formie graficznej. Polega ono na odpowiednim połączeniu zebranych punktów, aby uzyskać obraz będący wierną reprezentacia analizowanej powierzchni. Graficzne przedstawianie powierzchni w profilometrii stykowej wywodzi się z metod kartograficznych. Istnieją dwie podstawowe metody graficznej prezentacji powierzchni. Jedna z nich jest mapa konturowa, a druga izometryczny obraz powierzchni zwany aksonometrią. Tworzenie mapy konturowej polega na ustaleniu płaszczyzny na zadanej wysokości, znalezieniu punktów przecięć z liniami łączącymi i połączeniu tych punktów liniami warstwicowymi. Jako że metoda zbierania punktów jest metodą dyskretną, istnieją różne możliwości znajdowania i łączenia punktów przecięcia. Jednym z przykładów obliczania linii konturowej jest metoda wielościanu [7], w której zakłada się, że powierzchnia jest zbiorem trójkątów, których wierzchołki odpowiadają mierzonym punktom. Inne możliwe rozwiązanie przybliża linie konturowe funkcjami sklejanymi [8]. Metody takie stosowane są zazwyczaj wtedy, gdy interpolacja danych za pomocą linii prostej jest niewystarczająca, czyli np. w przypadku dużego kroku próbkowania. W pracy [9] zaproponowano konstruowanie linii konturowych zaczynając od uzyskiwania współrzędnych na przecięciach płaszczyzny o danej wysokości z odcinkami łączącymi punkty siatki, a następnie stosując interpolację liniową na długości odcinka. Współrzędne uzyskane w ten sposób były dalej łączone za pomocą odcinków linii prostych. Istnieje ponadto wiele alternatywnych metod wygładzania linii łączących, opartych na różnego rodzaju interpolacji. Z uwagi na gęstość linii warstwicowych możliwą do zaprezentowania obraz konturowy jest czasem niedokładny i oddaje bardziej naturę całej powierzchni (w tym strukturę kierunkową), a nie poszczególnych nierówności. Przykładową mapę konturową dla powierzchni wykonanej z tworzywa sztucznego pokazano na rys. 7.

Odmianą mapy konturowej jest mapa intensywności zwana też mapą odcieni szarości, gdzie do oddzielenia poszczególnych wysokości zamiast linii konturowych stosuje się kolejne odcienie szarości. Na podstawie mapy oceny szarości system komputerowego wspomagania wytwarzania ma możliwość rozpoznawania zastosowanego sposobu obróbki powierzchni. Mapę odcieni szarości dla powierzchni z rysunku 7 pokazano na rysunku 8.



Rys. 7. Przykładowa mapa konturowa Fig. 7. A contour map



Rys. 8. Mapa odcieni szarości dla powierzchni z rysunku 7 Fig. 8. Grey image map for surface from Fig. 7

Najczęściej stosowaną opcją graficznej prezentacji powierzchni jest obraz izometryczny tworzony w aksonometrii. Obraz trójwymiarowy jest tu uzyskiwany na podstawie nałożenia na siebie kolejnych profili zdejmowanych na ogół w płaszczyznach równoległych i po ukryciu linii niewidocznych. Chociaż jest to dwuwymiarowa projekcja danych trójwymiarowych, daje ona obraz perspektywiczny. Obraz izometryczny o odpowiedniej szerokości i rozdzielczości jest obecnie jedyną techniką dogodnie prezentującą powierzchnię pod kątem zastosowania. Wygląd powierzchni z rysunku 7 w aksonometrii pokazano na rysunku 9.

Obraz izometryczny powoduje, że czasami niezbyt wyraźnie widać strukturę kierunkową oraz doliny i wgłębienia. Metodą uniknięcia tego jest zastosowanie symetrii względem płaszczyzny XY, czyli dokonanie tzw. inwersji (odwrócenia współrzędnych). W ten sposób wierzchołki stają się wgłębieniami i odwrotnie (rys. 10).

W przypadku analizy topografii powierzchni zakrzywionych (głównie walcowych) usuwana jest ich krzywizna, czego istotę pokazano na rys. 11 [10].



Rys. 9. Obraz izometryczny dla powierzchni z rysunku 7 Fig. 9. Isometric view for surface from Fig. 7



Rys. 10. Inwersja powierzchni przedstawionej na rysunku 9 Fig. 10. Inversion of surface from Fig. 9

Dalsze możliwości analizy powierzchni zależą od zastosowanego oprogramowania i konkretnej aplikacji.



Rys. 11. Rozwijanie powierzchni walcowej w płaszczyznę Fig. 11. Development of cylindrical surface into a plane

Moga być one bardzo szerokie, czego dowodem sa możliwości oprogramowania Mountains tworzonego przez Digital Surf [11], będącego w tej chwili najpopularniejszym pakietem do topograficznej analizy powierzchni (we wrześniu 2012 ukazała się wersja 7), za pomocą którego przedstawiono m.in. rysunki 7 – 11. Wśród przyrządów stosujących Mountains lub jego wersje, zmodyfikowane pod konkretnych producentów, sa m.in.: profilometry stykowe i optyczne, mikroskopy interferencyjne i konfokalne, mikroskopy skaningowe z sondą, skaningowe mikroskopy elektronowe, mikroskopy z analizą obrazu, spektrometry ramanowskie i przyrządy do pomiaru błędów kształtu. Oprogramowanie pozwala na wykonanie szeregu operacji, takich jak: przetwarzanie danych 3D (X, Y, Z), praca na grupie powierzchni obrazów i profilów, przetwarzanie obrazów kolorowych i w odcieniach szarości, obrazy binarne itp. Możliwe jest usuwanie pewnych zjawisk zakłócających uwypuklanie żądanych cech, do czego szczególnie przydatne sa zaawansowane metody filtracji oraz parametryczny powierzchni opis zgodnie z najnowszymi normami z dziedziny. Wiele dodatkowych funkcji i operatorów (np. analiza cech geometrycznych konturu, analiza Fouriera 3D czy analiza ziaren i cząstek) oraz szereg dostępnych języków pracy (w tym polski) sprawia, że omawiany pakiet, choć chwilami zawierający drobne błędy [12], stwarza szerokie możliwości pracy zarówno dla nowicjuszy jak i dla wytrawnych adeptów topograficznej analizy powierzchni.

3. PARAMETRY PRZESTRZENNE

Pod koniec XX wieku gwałtownie wzrastające zainteresowanie topograficzną oceną powierzchni sprawiło konieczność podjęcia prac nad znormalizowaniem metod jej oceny i parametrów stosowanych do ilościowego opisu nierówności powierzchni.

Pierwszy projekt ukazał się w roku 1993, później był modyfikowany, aż do wersji obecnej normy ISO 25178, której pewne części są wciąż w trakcie przygotowania. Większość terminologii i pomysłów na analizę wywodzi się z prac uniwersytetów w Lyonie (Francja) i Birmingham (Wielka Brytania), które brały udział we wspólnym przedsięwzięciu naukowo badawczym, poświęconym stereometrycznej ocenie nierówności powierzchni, zorganizowanym pod auspicjami Unii Europejskiej w latach 1990-1993. W pierwszym założeniu zdecydowano się zdefiniować 14 parametrów opisujących liczbowo nierówności powierzchni 3D. Nazwano je "Birmingham 14", dla upamiętnienia miasta - siedziby jednego z uniwersytetów biorących udział w projekcie. Bardzo szybko z 14 zrobiło się 17 parametrów, wkrótce potem 25, a około roku 2005 było to już prawie 50. Niestety i tym razem gorączka parametrowa dała się we znaki. W marcu 2012 na III International Conference on Surface Metrology zaprezentowano artykuł dotyczący wyboru odpowiednich parametrów nierówności przy walcowaniu gdzie pojawiły się 94 parametry [13], a pod koniec roku 2012 Ourahmoune przedstawił w pracy doktorskiej analizę topografii powierzchni pod połączenia klejone analizując 98 parametrów [14]. Przedstawianie wszystkich parametrów stereometrii pomału zatem traci sens, a analiza ich doboru do konkretnej aplikacji staje się poważną pracą badawczą i analityczną. A zatem w tym rozdziale przedstawione zostaną najbardziej powszechnie stosowane z parametrów

nierówności w trzech wymiarach, które w dodatku znalazły uznanie w pracach normalizacyjnych.

Parametry i funkcje stosowane w analizie trójwymiarowej w większości przyjęto oznaczać literą "S" jako odpowiednik litery "R" w parametrach profilu. Parametry dotyczące cech objętościowych oznaczane są literą "V" od angielskiego słowa "volume" oznaczającego właśnie objętość. Wyróżniki topografii powierzchni podzielone zostały na dwie rodziny: związane z obszarem (z języka angielskiego - field) i związane z cechami (feature). Podstawowa różnica między nimi jest taka, że parametry związane z obszarem wykorzystują aparat statystyczny do powierzchni będącej chmurą punktów, natomiast parametry związane z cechami wykorzystują ten aparat do pewnego podzbioru zebranej powierzchni. Są one definiowane przy użyciu narzędzi rozpoznających poszczególne cechy, a cały proces zawiera 5 elementów: wybór cechy, segmentacja, określenie elementów znaczących, wybór atrybutów i przypisanie wartości liczbowej o charakterze statystycznym. Pierwszą rodzinę parametrów czyli związane z obszarem dzieli się na pięć grup: wysokościowe, częstotliwościowe, hybrydowe, funkcje i parametry z nimi związane oraz pozostałe. Parametry wysokościowe określa się w stosunku do obszaru definiowania parametrów, charakteryzującego opisaną powyżej powierzchnię wyskalowaną, oznaczanego litera A. Co ciekawe wśród parametrów wysokościowych dużo mniejsza wagę przykłada się do parametru Sa, zdefiniowanego podobnie jak parametry Pa, Wa i Ra dla profilu wymienianego w szeregu publikacji badawczych. Przystępując m.in. do prac i normalizacyjnych założono, że parametr ten będzie stosowany rzadziej, a zamiast niego przyjęto parametr Sq (odpowiednik Pq, Wq i Rq), co jest niewątpliwie słuszną tendencją, chociażby z punktu widzenia statystyki i nie powielania liczby parametrów opisujących to samo. Wysokość średnio kwadratowa, czyli średnie kwadratowe odchylenie powierzchni Sq definiowane jest analogicznie do Pq, Wq i Rq i określane od powierzchni odniesienia jako odchylenie standardowe wysokości nierówności powierzchni. Oblicza się je ze wzoru (4):

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy}$$
(4)

Współczynnik asymetrii powierzchni Ssk, czyli skośność, definiowany jest analogicznie do Psk, Wsk i Rsk, a oblicza się go z zależności (5):

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left[\frac{1}{A} \sqrt{\iint_A z^3(x, y) dx dy} \right]$$
(5)

Współczynnik nachylenia powierzchni Sku, czyli eksces lub kurtoza, również jest definiowany analogicznie do swoich dwuwymiarowych odpowiedników Pku, Wku i Rku, a oblicza się go ze wzoru (6):

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left[\frac{1}{A} \sqrt{\iint_A z^4(x, y) dx dy} \right]$$
(6)

Kolejne parametry wysokościowe – wysokość najwyższego wzniesienia powierzchni Sp i głębokość najniższego wgłębienia powierzchni Sv – definiowane są analogicznie odpowiednio do Pp, Wp i Rp jako wysokość najwyższego wzniesienia w obszarze definiowania oraz do Pv, Wv i Rv jako głębokość najniższego wgłębienia powierzchni w obszarze definiowania. Natomiast maksymalna wysokość powierzchni Sz (znów podobnie jak Pz, Wz i Rz, chociaż w wersji 2D jest to wysokość najwyższa a nie maksymalna, która odpowiada parametrom Pt, Wt i Rt) jest sumą wysokości najwyższego wzniesienia profilu Zp i głębokości najniższego wgłębienia profilu Zv w obszarze definiowania. Matematycznie parametry Sp, Sv i Sz można zapisać następująco (7):

$$S_{p} = \sup\{z(i, j)\}; \quad S_{v} = |\inf\{z(i, j)\}|; \quad S_{z} = S_{p} + S_{v}$$
 (7)

Ostatnim parametrem z tej grupy jest wspomniana już średnia arytmetyczna wysokość powierzchni Sa, czyli średnie arytmetyczne odchylenie powierzchni od powierzchni średniej, będące średnią arytmetyczną wartości bezwzględnych odchyłek wysokości powierzchni od powierzchni średniej. Parametr ten definiuje zależność (8):

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy$$
(8)

Dla drugiej grupy parametrów - częstotliwościowych - transformacja zależności z analizy dwuwymiarowej przestaje mieć sens. Dla profilu parametry te określane były w kierunku równoległym do linii średniej profilu. Problemem w przypadku analizy powierzchni jest to, że kierunków analizowania parametrów wzdłużnych dla dowolnej powierzchni można przyjąć nieskończenie wiele. Jeśli więc obliczany parametr ma reprezentować odległość pomiędzy wierzchołkami lub punktami przecięcia powierzchni z obliczonym elementem odniesienia, to najpierw należałoby określić kierunek, w którym parametr ten będzie obliczany, a to nie zawsze jest uzasadnione funkcjonalnie i może powodować niejasności. Stąd topograficzne parametry częstotliwościowe są zupełnie inne niż ich odpowiedniki dla profilu. Grupa parametrów częstotliwościowych jest zbiorem dwuelementowym, a rozpoczyna ją długość autokorelacji Sal, będąca właściwie najszybciej gasnącą długością autokorelacji. Jest ona miarą zanikania funkcji autokorelacji ACF(tx,ty), czyli najkrótszym poziomym odcinkiem, na którym znormalizowana funkcja autokorelacji maleje do wartości s, która jest liczbą większą lub równą zeru i mniejszą od 1 (domyślnie 0,2 zamiast stosowanych w 2D wartości 0,1 lub odwrotności liczby e w dowolnym kierunku. Sal liczbowo wyraża się wzorem (9):

$$Sal = \lim_{tx,ty \in R} \sqrt{tx^2 + ty^2}$$
(9)

gdzie R określa się jako (10):

$$R = \{(tx, ty) : ACF(tx, ty) \le s\}$$
(10)

Funkcja autokorelacji jest też wykorzystana do zdefiniowania szczytu, co przydaje się w definiowaniu innych parametrów.

Kolejny parametr częstotliwościowy to współczynnik struktury geometrycznej powierzchni Str, wyrażający miarę jej długich grzbietów i będący zależnością najkrótszego do najdłuższego odcinka zanikania funkcji korelacji. Można go zapisać jako (11):

$$Str = \frac{\frac{\min}{tx, ty \in R} \sqrt{tx^2 + ty^2}}{\frac{\min}{tx, ty \in Q} \sqrt{tx^2 + ty^2}}$$
(11)

gdzie R określa się analogicznie jak poprzednio, a Q wyrażane jest zależnością (12):

$$Q = \{(tx, ty) : ACF(tx, ty) \ge s\}$$
(12)

przy czym ACF ma jeszcze tą właściwość, że jest zawsze większe lub równe *s* na linii prostej łączącej punkt o współrzędnych (tx,ty) z początkiem układu współrzędnych. Wartość domyślna *s* to podobnie jak dla Sal 0,2. Parametr Str przyjmuje wartości od 0 dla powierzchni idealnie anizotropowej do 1 dla idealnie izotropowej.

Trzecią – również dwuelementową – grupą parametrów związanych z obszarem są parametry hybrydowe. Średni kwadratowy gradient powierzchni Sdq, opisujący średnie kwadratowe pochylenie nierówności powierzchni, jest definiowany analogicznie do średniego kwadratowego wzniosu profilu (Pdq, Wdq, Rdq) i obliczany jako (13):

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_{A} \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial x}\right)^{2} + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial y}\right)^{2} dx dy}$$
(13)

Współczynnik powierzchni rozwinięcia obszaru granicznego Sdr określany jest jako stosunek przyrostu obszaru granicznego na obszarze definiowania do wielkości obszaru definiowania. Występuje tu pewne podobieństwo do analizy profilu według starszych norm, gdzie występowała długość rozwinięcia profilu. Matematycznie Sdr wyraża wzór (14):

$$S_{dr} = \frac{1}{A} \left[\iint_{A} \left(\sqrt{\left[1 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right)^{2} + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right)^{2} \right]} - 1 \right) dx dy \right]$$
(14)

Najliczniejszą czwartą grupę wyróżników topografii powierzchni stanowią funkcje i parametry z nimi związane. Pierwszą z nich jest funkcja powierzchniowego udziału materiałowego, reprezentująca zależność powierzchniowego udziału materiałowego od wysokości. Jest ona przeniesieniem analizy 2D na grunt 3D i podobnie jak dla profilu można ją interpretować jako skumulowaną funkcję prawdopodobieństwa współrzędnych Z(x,y). Z krzywej tej – również podobnie jak w analizie 2D –obliczane są parametry liczbowe

i wyprowadzane kolejne funkcje. Są wśród nich: współczynnik powierzchniowego udziału materiałowego Smr(c), który jest procentowym udziałem materiału na danej wysokości c i odwrotny współczynnik powierzchniowego udziału materiałowego Smc(mr), który jest wysokością c odpowiadającą danemu procentowemu udziałowi materiału.

Analiza parametryczna krzywej udziału materiałowego jest analogiczna do oceny powierzchni na podstawie profilu, włącznie z definicjami konkretnych wyróżników. Krzywą zatem dzieli się na części związane z wzniesieniami, rdzeniem i wgłębieniami (rys. 12), co dalej pozwala na obliczanie zredukowanej wysokości wierzchołków Spk, wysokości rdzenia Sk, zredukowanej głębokości dolin Svk, oraz dwóch wartości udziału materiałowego Smr1 (udział w miejscu gdzie strefa wzniesień przechodzi w strefę rdzenia) i Smr2 (udział w miejscu gdzie strefa rdzenia przechodzi w strefę wgłębień).

Druga metoda oceny powierzchni na podstawie udziału materiału wykorzystuje dystrybuantę udziału materiałowego, czyli takie przedstawienie, w którym udział materiałowy jest wyrażany jako prawdopodobieństwo na siatce rozkładu normalnego. Ten udział jest wyrażany w wielokrotnościach odchylenia standardowego, odkładanych równomiernie na osi poziomej (rys. 13).

Krzywa dzieli się na 5 obszarów w zależności od stref powstania rzędnych nierówności: A – wysokie wierzchołki (lub zanieczyszczenia), B – obszar plateau, C – obszar niestabilny (przejście ze strefy plateau do strefy dolin), D – obszar dolin, E – głębokie rysy i doliny. Dla tak podzielonych stref oblicza się trzy parametry charakteryzujące.



Rys. 12. Parametry z powierzchniowej krzywej udziału materiałowego Fig. 12. Parameters from material ratio area curve



Rys. 13. Ocena powierzchni na podstawie udziału materiałowego jako prawdopodobieństwa Fig. 13. Surface assessment basing on material ratio as probability

Spq czyli średnio kwadratowe odchylenie plateau jest definiowane jako nachylenie prostej regresji przechodzącej przez region plateau, ale w praktyce jest obliczane jako różnica poziomów początku i końca obszaru plateau, stąd jego wartość podawana jest w µm. Smq jest to względny udział materiałowy na przecięciu plateau i wgłębień. Jego wartość podawana jest w %. Svq czyli średnio kwadratowe odchylenie dolin jest definiowane jako nachylenie prostej regresji przechodzącej przez region dolin i podobnie jak Spq w praktyce jest obliczane jako różnica poziomów początku i końca obszaru dolin, stąd jego wartość również podawana jest w µm.

Kolejne parametry z tej grupy dotyczą objętości. Objętość pustek Vv(p) jest to objętość obszaru pozbawionego materiału na jednostkę powierzchni dla danego udziału materiałowego. Oblicza się ją z zależności (15):

$$Vv(p) = \frac{K}{100\%} \int_{p}^{100\%} [Smc(p) - Smc(q)] dq$$
(15)

gdzie K jest stałą przeliczeniową dla jednostek. Objętość pustek dolin Vvv (rys. 14) jest objętością obszaru pozbawionego materiału na danym poziomie p (16):

$$Vvv = Vv(p) \tag{16}$$

Domyślną wartością poziomu p jest 80%.

Objętość pustek rdzenia Vvc jest różnicą objętości obszarów pozbawionych materiału na poziomach p i q (17):

$$Vvc = Vv(p) - Vv(q) \tag{17}$$

Domyślną wartością poziomu p jest 10%, a poziomu q 80%. Objętość materiału Vm(p) jest to objętość obszaru wypełnionego materiałem na jednostkę powierzchni dla danego udziału materiałowego. Oblicza się ją z zależności (18):



Rys. 14. Parametry objętościowe obliczane z powierzchniowej krzywej udziału materiałowego Fig. 14. Volume parameters calculated from material ratio area curve

$$Vm(p) = \frac{K}{100\%} \int_{0}^{p} [Smc(q) - Smc(p)] dq$$
(18)

gdzie K analogicznie jak dla pustek jest stałą przeliczeniową dla jednostek. Objętość materiału wzniesień Vmp jest objętością obszaru wypełnionego materiałem na danym poziomie p (19):

$$Vmp = Vm(p) \tag{19}$$

Domyślną wartością poziomu p jest 10%. Objętość materiału rdzenia Vmc jest różnicą objętości obszarów wypełnionych materiałem na poziomach p i q (20):

$$Vmc = Vm(q) - Vm(p) \tag{20}$$

Domyślną wartością poziomu p jest 10%, a poziomu q 80%.

Ekstremalna wysokość wierzchołków definiowana jest jako różnica w wysokościach pomiędzy poziomami p i q udziału materiałowego wyrażanego w procentach (21):

$$Sxp = Smc(p) - Smc(q)$$
⁽²¹⁾

Domyślną wartością poziomu p jest 2,5%, a poziomu q 50%.

Funkcja gęstości gradientu pokazuje częstotliwości względne w stosunku do kąta najbardziej stromego gradientu $\alpha(x,y)$ i kierunku najbardziej stromego gradientu $\beta(x,y)$, w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara względem osi X. Kąty te wyraża się zależnościami (22) i (23):

$$\alpha(x, y) = \arctan \sqrt{\frac{\partial z^2}{\partial y} + \frac{\partial z^2}{\partial x}}\Big|_{(x, y)}$$
(22)

$$\beta(x, y) = \arctan\left[\frac{\frac{\partial z}{\partial y}}{\frac{\partial z}{\partial x}}\right]_{(x, y)}$$
(23)

Funkcja obrazowana jest przestrzennie, jako częstotliwość w osi Z w stosunku do płaszczyzny X,Y stworzonej przez kierunek najbardziej stromego gradientu (oś X) i kąt najbardziej stromego gradientu (oś Y).

Kolejne parametry z grupy funkcji i parametrów z nimi związanych są nazywane opartymi o metodę fraktalną. Pochodzenie fraktali, a właściwie zastosowanie ich w pracach poza matematycznych wywodzi się od francuskiego matematyka z polskim rodowodem Benoita Mandelbrota [15], a sam termin 'fraktal' wywodzi się od łacińskiego słowa 'fractus' oznaczającego złamany, cząstkowy. W znaczeniu potocznym traktuje się go jako synonim obiektu samo-podobnego, czyli takiego, którego części są podobne do całości, albo "nieskończenie subtelnego", czyli ukazującego subtelne szczegóły nawet w wielokrotnym powiększeniu. Ze względu na olbrzymią różnorodność przykładów matematycy obecnie unikają podawania ścisłej definicji, proponując określać fraktal jako zbiór, który m.in. ma nietrywialną strukturę w każdej skali, nie daje łatwo opisać swojej struktury w języku tradycyjnej geometrii euklidesowej, jest samo-podobny, jeśli nie w sensie dokładnym, to przybliżonym lub stochastycznym, ma względnie prostą definicję rekurencyjną, oraz wygląd naturalny (poszarpany, kłębiasty itp.). Bazując na tym podejściu cały szereg ludzi nauki usiłowało opisywać i modelować powierzchnie wykorzystując teorię geometrii fraktalnej [16],[17],[18]. Opracowano trzy schematy generujące profil lub powierzchnię fraktalną. Pierwszy nazywany jest funkcją Weierstrassa-Mandelbrota, drugi polega wykorzystaniu gęstości widmowej mocy, a trzeci zwany metodą sukcesywnego dodawania losowego opiera się na funkcji strukturalnej. Najpopularniejszą jest funkcja Weierstrassa-Mandelbrota [19], wyrażana jako (24):

$$z(x) = G^{D-1} \sum_{n=n_1}^{\infty} \frac{\cos(\gamma^n x + \phi_n)}{\gamma^{(2-D)n}}$$
(24)

gdzie Φn jest losową fazą, a γ współczynnikiem skali.

Wokół zastosowania fraktali w analizie powierzchni inżynierskich narosło wiele kontrowersji. Przede wszystkim jak bumerang pojawia się pytanie czy fraktale można stosować do wszystkich typów powierzchni. Pojawiły się prace przedstawiających opisy fraktalne powierzchni inżynierskich [20],[21]i opinie, że powierzchnie po elektrodrążeniu, szlifowaniu, a także powierzchnie poddane zużyciu mają strukturę fraktalną, a ich parametry fraktalne mogą odzwierciedlać specyficzne cechy powierzchni pokonując niekorzystne aspekty konwencjonalnych parametrów chropowatości. Najwięcej uwagi poświęcono powierzchniom po szlifowaniu, gdzie analiza fraktalna spotyka się z najmniejszymi oporami. Z pozostałymi sposobami obróbki ubytkowej jest już gorzej, a zwłaszcza powierzchnia po zużyciu ma cechy fraktalne mocno dyskusyjne. Niemniej próby trwają do dziś, pytanie tylko jak bardzo były i są one udane. Whitehouse, po pierwszych bardzo pozytywnych opiniach na ten temat, ostatecznie zmienił swoje zdanie prezentując je w artykule pod znamiennym tytułem: Fraktal czy fikcja [22]. Przedstawił w nim krytyczną ocenę zastosowania analizy fraktalnej do chropowatości powierzchni, kwestionując zwłaszcza jej przydatność do powierzchni w budowie maszyn i określając ją jako bardziej wirtualną niż rzeczywistą. Wśród wad wskazał między innymi to, że w budowie maszyn dla tej samej powierzchni różne metody obliczania wymiaru fraktalnego dają różne wyniki, co dyskredytuje taki sposób analizy. Fraktale można zatem używać do charakteryzacji zjawisk naturalnych, takich jak np. mechanizmy wzrostu, pęknięcia czy osadzanie się powłok i pokryć. Niestety większość działań produkcyjnych lub funkcjonalnych ma zupełnie inne tendencje. Skąd zatem wzięło się tyle prób wykorzystania fraktali w budowie maszyn uznanych za udane? Według Whitehouse'a przyczyn jest kilka. Jedną z nich jest to, że losowa natura takich procesów jak szlifowanie, piaskowanie itp. daje się opisać statystyką Poissona czyli Markowa. Niestety wykładniczy charakter statystyki Markowa dla małych długości fali bardzo przypomina właściwości fraktalne. Dalej podobieństwa już nie ma i powierzchnie okazują się zupełnie "niefraktalne", a po prostu "markowowskie". Podobny sceptycyzm budzi fakt, że geometria fraktalna nie jest w stanie w żaden sposób oddać kształtu narzędzia skrawającego, a powierzchnia wykazuje charakter fraktalny tylko, jeśli ślady obróbki reprezentowane są przez impulsy Diraca. Taki przypadek w praktyce związany jest jednak raczej z wystąpieniem pęknięć na powierzchni niż z obróbką. Za zaletę fraktali uważa się ich niezależność od skali, dzięki czemu mamy podobne ślady o różnych wielkościach. Ale zastąpienie tradycyjnych parametrów parametrami niezależnymi od skali jest błędne filozoficznie. Na przykład parametry funkcjonalne odnoszące się do smarowania czy zużycia ani nie są niezależne od skali ani nawet być takimi nie powinny. Podobnie w relacjach dynamicznych: zmiana skali zjawiska powoduje zmianę zależności pomiędzy bezwładnością, tłumieniem i siłami elastycznymi. Budując podstawy analizy parametrycznej opartej o fraktale stwierdzono jednak, że są sytuacje, w których parametry fraktalne mogą być przydatne, a ich zastosowanie w konkretnej aplikacji i tak zależeć będzie od użytkownika. Poza tym w odróżnieniu od prób zastosowania wymiary fraktalnego w analizie 2D, tutaj skupiono się na wykorzystaniu do celów obliczania parametrów operacji morfologicznych.

Funkcja skali objętości Svs(s) jest to objętość pomiędzy morfologicznym zamykaniem i otwieraniem dla powierzchni, po zastosowaniu płaskiego poziomego wycinka kwadratowego jako elementu strukturalnego w stosunku do wielkości elementu strukturalnego. Funkcja obszaru względnego Srel(s) jest zależnością ilorazu obszaru obliczanego po transformacji siatka trójkatów na określonej długości skali do obszaru definiowania w stosunku do skali długości, dla której dokonuje się obliczeń skali. Kompleksowa objętość fraktalna Svfc określana jest z funkcji skali objętości jako 1000 krotna wartość pochylenia wykresu w skali podwójnie logarytmicznej objętości w stosunku do długości skali. Natomiast kompleksowy obszar fraktalny Safc podaje się z funkcji obszaru względnego jako -1000 krotna wartość pochylenia wykresu w skali podwójnie logarytmicznej obszaru względnego w stosunku do długości skali. Kolejnym parametrem fraktalnym jest gładko chropowata skala krzyżowa SRC. Definiuje się ja jako pierwsza skala krzyżowa napotkana przy przejściu ze skali względnie dużej, gdzie powierzchnia wydaje się być gładką, do skali mniejszej, gdzie wydaje się chropowata. Przez skalę krzyżową rozumie się długość skali, na której zachodzi zmiana w pochyleniu obszaru względnego lub w funkcji skali objętości. Z tymi pojęciami związana jest również wartość progowa Th, definiowany jako wartość obszaru względnego lub objętości używana do określenia gładko chropowatej skali krzyżowej. A zatem przechodząc od skali największej w kierunku najmniejszej do określenia SRC używany jest pierwszy obszar względny lub objętość przekraczające wartość progową. Domyślna wartość parametru Th to 10%.

Ostatnią grupą parametrów związanych z obszarem są parametry pozostałe. Należy do niej – jak na razie – tylko jeden wyróżnik, a mianowicie kierunkowa struktura powierzchni Std. Wyraża ona miarę kierunku układu liniowego powierzchni i jest określana jako kąt w stosunku do określonego kierunku θ , przy którym występuje maksymalna wartość dwuwymiarowego widma mocy APS.

Niezależnie od tych parametrów w pracach badawczych postuluje się używanie kolejnych, ale jak na razie nie znalazły one szerszego uznania w pracach normalizacyjnych.

Druga rodzina parametrów związana jest z cechami. Filozofia działania jest tutaj zupełnie inna, ponieważ tak naprawdę w rodzinie tej często nie mamy do czynienia z konkretnymi definicjami, ale raczej z zestawem narzędzi technik do rozpoznawania określonych układów nierówności, które można wykorzystać do charakteryzacji określonych cech. Proces rozpoznawania cech przebiega w 5 etapach, którymi są: wybór cechy, segmentacja, określenie elementów znaczących, wybór atrybutów i przypisanie wartości statystycznej. Wyróżnia się trzy główne typy cech: powierzchniowe (wzgórza H i doliny D), liniowe (linie przebiegu C i pasma R) oraz punktowe (wierzchołki P, wgłębienia V i siodła S). Ciekawostką jest fakt, że koncepcja wzgórz i dolin jest rozwinięciem XIX-wiecznego pomysłu Maxwella [23], który zajmując się kartografią zaproponował podział krajobrazu na obszary składające się z wzgórz i obszary składające się z dolin. Maxwellowskie wzgórze jest obszarem, w którym maksymalna liczba ścieżek wznoszących prowadzi na jeden określony wierzchołek, a dolina to obszar, gdzie maksymalna liczba ścieżek opadających prowadzi do jednego określonego wgłębienia. Granice pomiędzy wzgórzami określone zostały jako cieki wodne, a granice pomiędzy dolinami to działy wodne. Maxwell pokazał ponadto rolę siodła, jako elementu pozwalającego przejść z jednego pasma na drugie i z jednej doliny do sąsiedniej. Przez szereg lat te dociekania traktowano raczej jako swoistą ciekawostkę filozoficzną, aż doczekały się ponownego odkrycia [24]. Po dokonaniu wyboru

cechy przeprowadzana jest segmentacja, używana do określenia regionu, z którego dana cecha będzie obliczana. Polega ona na znalezieniu wierzchołków i wgłębień oraz takim łączeniu segmentów, aby uzyskać niezbędną ich ilość do pokazania cechy. Kryteria segmentacji to na przykład lokalny wierzchołek/wgłębienie przy przycinaniu Wolfa (Wolfprune), gdzie progiem jest pewien procent wartości Sz, objętość wzniesienia/wgłębienia na wysokości siodła (VoIS), gdzie progiem jest określona objętość, obszar wzniesienia/wgłębienia (Area), gdzie progiem jest pewien procent obszaru definiowania, oraz obwód wzniesienia / wgłębienia (Circ), gdzie progiem jest określona długość. Dalej w procesie definiowania parametrów związanych z cechami określa się te z nich, które mają decydujące znaczenie dla funkcji jaką powierzchnia ma spełniać. Dla każdej z tych funkcji należy określić funkcję segmentacyjną identyfikującą cechy istotne. Dla cech powierzchniowych metodą określenia ich ważności może być np. to, czy na danej wysokości łączy się z krawędzią analizowanego obszaru (cecha otwarta - Open) czy nie (cecha zamknięta - Closed). Wysokość może być przy tym podana nie jako współrzędna, ale jako określony udział materiałowy. Z kolei dla cech punktowych przyjmuje się, że wierzchołek jest istotny jeśli posiada jedną z pierwszych N wysokości wierzchołków po przycinaniu Wolfa (Top), a wgłębienie jest istotne jeśli posiada jedną z pierwszych N głębokości wgłębień po przycinaniu Wolfa (Bot). Można też zastosować wszystkie cechy (All).

Kolejnym krokiem procedury jest wybór atrybutów cech. Większość z nich to miary wielkości danych cech, np. długości, pola powierzchni lub objętości. Wśród atrybutów cech powierzchniowych można znaleźć na przykład: objętość na wysokości siodła (VoIS), objętość na wysokości połączenia z krawędzią (VoIE), pole powierzchni (AreaE) oraz obwód (Cleng). Atrybutem cechy liniowej może być długość linii (Leng) a cechy punktowej wysokość lokalnego wierzchołka / wgłębienia (Lpvh), lokalna krzywizna w punkcie krytycznym (Curvature) albo kolejna liczba (Count). Ostatnim etapem jest przypisanie wartości statystycznej. Atrybutami statystyki mogą być: średnia arytmetyczna (Mean), Wartość maksymalna (Max), wartość minimalna (Min), wartość średnia kwadratowa (RMS), udział procentowy powyżej podanej wartości (Perc), Histogram (Hist), suma wartości (Sum) albo gęstość czyli suma wszystkich wartości atrybutu dzielona przez obszar definiowania (Density). Konwencji charakteryzacji parametru w jego opisie dopełniają litery FC na początku, mówiące o tym, że jest to parametr związany z cechą. A zatem przykładowe oznaczenie przy parametrze: FC: D; Wolfprune: 10%; Open; VoIE; Hist, oznacza, że parametr jest związany z cechą (FC), dotyczy doliny (D), jako metodę segmentacji zastosowano przycinanie Wolfa (Wolfprune) a progiem jest 10% wartości Sz, cecha ma dostęp do krawędzi obszaru (Open), atrybutem cechy jest objętość na wysokości połączenia z krawędzią (VoIE), a liczbową metodą charakteryzacji będzie histogram (Hist). Korzystając z takiego algorytmu można naturalnie definiować własne parametry, przydatne czasem tylko w jednej bardzo konkretnej aplikacji. W konsekwencji doprowadzi to zapewne do dalszego zwiększenia liczby parametrów stosowanych do oceny nierówności powierzchni 3D, ale z drugiej strony pozwoli na lepsze monitorowanie zmian zachodzących w topografii.

Wśród parametrów związanych z cechami istnieją również takie, których definiowanie jest bardziej uniwersalne. Gęstość wierzchołków Spd wyraża liczbę wzniesień na jednostkę

powierzchni. Jest ona definiowana jako (25):

$$Spd = FC; H; Wolfprune : X\%; All; Count; Density$$
 (25)

Domyślna wartość X wynosi 5%, podobnie jak dla wszystkich opisanych poniżej parametrów. Średnia arytmetyczna krzywizna wierzchołków Spc wyraża się zależnością (26):

$$Spc = FC; P; Wolfprune : X\%; All; Curvature; Mean$$
 (26)

Pięciopunktowa wysokość wierzchołka określana jest jako średnia wartość wysokości 5-ciu globalnie najwyższych wierzchołków (27):

$$S5p = FC; H; Wolfprune : X\%; Top : 5; Lpvh; Mean$$

$$(27)$$

Pięciopunktowa wysokość wgłębienia jest to średnia wysokość 5-ciu globalnie najniższych wgłębień (28):

$$S5v = FC; D; Wolfprune : X\%; Bot : 5; Lpvh; Mean$$

$$(28)$$

Wysokość dziesięciopunktowa S10z jest sumą dwóch poprzednich parametrów (29):

$$S10z = S5p + S5v \tag{29}$$

Średni obszar wgłębień Sda(c) określa się wzorem (30):

$$Sda(c) = FC; D; Wolfprune : X \%; Open : c / Closed : c; AreaE; Mean$$
 (30)

gdzie oznaczenie Open:c/Closed:c pozwala wybrać albo cechę otwartą albo zamkniętą na wysokości c, a domyślnie cechą znaczącą jest Closed. Podobne założenie stosuje się również dla wszystkich opisanych poniżej parametrów. Średni obszar wierzchołków Sha(c) określa się zależnością (31):

$$Sha(c) = FC; H; Wolfprune : X \%; Open : c/Closed : c; AreaE; Mean$$
 (31)

Średnia objętość wgłębień Sdv(c) określana jest jako (32):

$$Sdv(c) = FC; D; Wolfprune : X \%; Open : c / Closed : c; VoIE; Mean$$
 (32)

Średnia objętość wierzchołków Shv(c) określana jest natomiast z zależności (33):

$$Shv(c) = FC; H; Wolfprune : X \%; Open : c / Closed : c; VoIE; Mean$$
 (33)

4. WNIOSKI

Jak widać z powyższego opisu analiza parametryczna nierówności powierzchni 3D w ciągu około dwudziestu lat stała się procesem bardzo złożonym. Problemem o charakterze badawczym staje się już nie tylko wybór konkretnego parametru do oceny danej powierzchni, ale nawet jego konfiguracja. Prace normalizacyjne z tego zakresu są w dalszym ciągu mocno zaawansowane, co z pewnością wróży powstawanie kolejnych wyróżników.

Aktualny stan opisu profilu, czyli chropowatości w ujęciu 2D wynika z oddziaływania szeregu różnorodnych czynników, z których najważniejszymi są:

- niezależny rozwój metrologii chropowatości w wielu krajach oparty na różnych definicjach, parametrach i ich oznaczeniach,
- dążenie do opisu cech profilu możliwie szczegółowego (za pomocą parametrów) i ogólnego (za pomocą funkcji) jednocześnie,
- poszukiwanie parametrów mających ścisłe związki z konkretnymi cechami użytkowymi powierzchni,
- stosowanie różnorodnych metod i przyrządów pomiarowych, z których większość umożliwia pomiar tylko nielicznych cech profilu,
- konkurencja wytwórców sprzętu pomiarowego, którzy zwiększając liczbę parametrów mierzonych danym przyrządem manifestują jego wszechstronność,
- wielokrotne zmiany norm dotyczących struktury geometrycznej powierzchni.

Skutkiem tego jest pewien nieporządek w definicjach parametrów i ich liczbie. Poza tym często inaczej określa się parametry dla metod profilometrycznych, a inaczej np. dla optycznych i niekiedy - ze względu na inną naturę zjawisk wykorzystywanych w pomiarach - są to w ogóle zupełnie inne parametry, niekiedy ściśle związane z przyrządami pomiarowymi, którymi są określane. Aktualnie istnieje bardzo duża liczba parametrów, rozkładów i funkcji określających geometryczną strukturę powierzchni. Niektóre z nich są ze sobą powiązane i nie zawsze uzasadnione jest stosowanie skorelowanych parametrów do opisu tej samej powierzchni. Powierzchnie są co prawda często tworami skomplikowanymi, niemożliwymi do opisania jednym tylko parametrem, co wyjaśnia historyczną tendencję do wzrostu liczby stosowanych parametrów. Na początku lat 80-tych Whitehouse wskazując na nonsens istnienia zbyt wielu parametrów nazwał go gorączką parametrową. Ale tendencja wzrostowa po tej publikacji nie osłabła, wspomagana jeszcze rosnącymi gwałtownie możliwościami obliczeniowymi. Niestety, w późniejszych latach przeniosła się ona również do analizy 3D.

Charakterystyka powierzchni w budowie maszyn utrudniona jest dodatkową zmiennością wartości parametrów w różnych miejscach, wynikającą z samego procesu obróbki. Dla każdego parametru zakres jego rozrzutu jest inny, większy z reguły dla parametrów wzdłużnych niż wysokościowych i w praktyce sięgać on może nawet kilkudziesięciu procent. Jak na razie pewne wydaje się stwierdzenie, że fikcją jest dążenie do znalezienia czy określenia jednego parametru, liczby charakteryzującej powierzchnię w sensie ogólnym. Taka sytuacja może się zdarzyć tylko przy wysoce specjalistycznych

zastosowaniach i bardzo stabilnych procesach. Wtedy taka "liczba" określa jedynie stopień przydatności powierzchni do danego celu, przy czym może ona reprezentować jakikolwiek parametr, nawet zupełnie nowy i niemający praktycznego znaczenia technicznego w innych aplikacjach. Przejawem takich tendencji są parametry związane z cechami i funkcyjny sposób ich wyznaczania. Ze względu na rosnące wymagania stawiane maszynom i urządzeniom w wielu aplikacjach niezbędne jest przejście do oceny wieloparametrowej. W praktyce przemysłowej powinno dążyć się do prowadzenia kontroli chropowatości powierzchni w oparciu o dwa do trzech parametrów, z podaniem sposobu obróbki. Parametry te powinny być dobierane w oparciu o badania zależności pomiędzy parametrami chropowatości i właściwościami użytkowymi części maszyn.

LITERATURA

- [1] MURTHY T.S.R., REDDY G.C., RADHAKRISHNAN V., 1982, Different functions and computations for surface topography, Wear, 83/2, 203-214.
- [2] DONG W.P., MAINSAH E., STOUT K.J., 1995, *Reference planes for the assessment of surface roughness in three dimensions*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 35/2, 263-271.
- [3] MURTHY T.S.R., ABDIN S.Z., 1980, *Minimum zone evaluation of surfaces*, International Journal of Machine Tools Design and Research, 20, 123-136.
- [4] WIECZOROWSKI M., 2009, *The use of topographic analysis of surface roughness measurements*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Habilitation Thesis, 429 (in Polish).
- [5] KWEON I.S., KANADE T., 1994, *Extracting topographic terrain features form elevation maps*, Computer Vision, Graphics and Image Processing. Image Understanding, 59/2, 171-182.
- [6] WOLF G.W., 1991, A Fortran subroutine for cartographic generalization, Computers & Geoscience, 17/10, 1359-1381.
- [7] HARBAUGH J.W., MERRIAM D.F., 1968, Computer applications in stratigraphic analysis, Wiley, New York.
- [8] ADAMS J., GARY J., 1974, Compact representation of contour plots for phone line transmission, Comm. ACM, 17, 333-336.
- [9] TSUKADA T., SASAJIMA K., 1981, A three-dimensional measuring technique for surface asperities, Wear, 71, 1-14.
- [10] WILLIAMSON J.B.P., 1967, *The microtopography of surfaces*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, 182, 3k, 8, 21-30.
- [11] www.digitalsurf.fr
- [12] DZIERWA A., REIZER R., PAWLUS P., GRABON W., 2012, Variability of areal surface topography parameters due to the change in surface orientation to measurement direction, Proceedings of the 3rd International Conference on Surface Metrology, Annecy, France.
- [13] DELTOMBE R., BIGERELLE M., 2012, *How to select the most relevant 3D roughness parameters of a surface*, Proceedings of the 3rd International Conference on Surface Metrology, Annecy, France.
- [14] OURAHMOUNE R., 2012, Contribution à la compréhension de la fonctionnalisation mécanique de surface des composites à matrice thermoplastique destinés à l'assemblage par collage, Dissertation, École Centrale de Lyon5.
- [15] MANDELBROT B.B., 1977, Fractals, forms, chance and dimension, Freeman, San Francisco.
- [16] BERRY M.V., HANNEY J.H., 1978, Topography of random surfaces, Nature, 273, 573.
- [17] BROWN C.A., SAVARY G., 1998, *Scale-sensitivity, fractal analysis and simulations*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 38/5-6, 633-637.
- [18] HASEGAWA M., LIU J., OKUDA K., NUNOBIKI M., 1996, Calculation of the fractal dimensions of machined surface profiles, Wear, 192, 40-45.
- [19] BERRY M.V., LEWIS Z.V., 1980, On the Weierstrass-Mandelbrot fractal function, Proceedings of the Royal Society of London A, 370, 459-484.

- [20] LOPEZ J., HANSALI G., ZAHOUANI H., LE BOSSE J.C., MATHIA T., 1995, 3D fractal-based characterisation for engineered surface topography, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 35/2, 211-217.
- [21] WEHBI D., ROQUES-CARMES C., TRICOT C., 1992, *Perturbation dimension for describing rough surfaces*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 32/1-2, 211-216.
- [22] WHITEHOUSE D.J., 2001, Fractal or fiction, Wear, 249, 345-353.
- [23] MAXWELL J.C., 1870, *On hills and dales*, The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, Series 4/40, 421-425.
- [24] MARK D.M., WARNTZ W., 1982, James Clerk Maxwell, the first quantitative geomorphologies? Discussion, Mathematical Geology, 14/2, 195-197.

THEORETICAL BASIS OF SPATIAL ANALYSIS OF SURFACE ASPERITIES

Every material item is separated from surroundings by boundaries that are surfaces. Each such a surface is featured with certain asperities, that appear on it and are present on everything that we can touch, inspect and observe. Characterizing them is a very important issue, because it allows to assess surfaces regarding their quality and functionality. In the paper basis of three dimensional analysis of surface asperities are described. Types of asperities are presented and method of choosing a sampling length and nominal element are shown. Ways of surface filtering including the most up to day ones e.g. Wolf pruning are discussed. Three dimensional parameters calculated from topographical data are described with their division into area related ones and connected with features as well as formulas used to calculate them.