

	Organizatorzy: Politechnika Łódzka Wydział Mechaniczny	XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKI ŚCIERNEJ Łódź - Uniejów 09-11.09.2015	
	• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn		

Modelowanie topografii powierzchni po procesie szlifowania z zastosowaniem mechanizmów kumulacji składowych o różnym wymiarze fraktalnym

Modeling of surface topography in the grinding process with application of the mechanisms of cumulative components of varying fractal dimension

**WOJCIECH KACALAK
 FILIP SZAFRANIEC ***

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.361

Generowanie topografii powierzchni zgodnych ze skutkami określonego procesu obróbki może być wynikiem symulacji procesu. W przypadku obróbki ścierniej, gdy powierzchnia obrabiana jest kształtowana przez wielką liczbę ziaren (nawet 10^6 - 10^9 ziaren na mm^2 powierzchni), to obliczenia symulacyjne są niezwykle czasochłonne i mogą wymagać nawet ponad 10^{18} operacji matematycznych. Oddziaływania ziaren ściernych w kolejnych przejściach, sekwencyjnie zmniejszające nierówności powierzchni poprzez usuwanie coraz mniejszych warstw materiału, mogą być opisywane, jako addytywna kumulacja składowych o coraz mniejszej wysokości nierówności i coraz wyższym wymiarze fraktalnym. W referacie przedstawiono metodykę i algorytm tworzenia modeli powierzchni po obróbce ścierniej.

SŁOWA KLUCZOWE: topografia powierzchni, obróbka ścierna, wymiar fraktalny

A Generating the surface topography consistent with the effects of a particular the machining process may be the result of process simulation. If the abrasive machining when a machining surface is formed by a large number of grains (even 10^6 - 10^9 grains per mm^2 in area), the simulation calculations are extremely time consuming and may require even more than 10^{18} mathematical operations. The impact of abrasive grains in subsequent passes, sequentially reduce interest topography of the surface and removes smaller and smaller layers of material, they can be described as additive components stereometric accumulation of decreasing the amount of unevenness and increasingly higher fractal dimension.

KEYWORDS: surface topography, abrasive machining, frac-

* prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak (wojciech.kacalak@tu.koszalin.pl), mgr inż. Filip Szafraniec (filip.szafraniec@tu.koszalin.pl),

tal dimension

Wybrane problemy oceny topografii powierzchni po szlifowaniu

Wśród prac, dotyczących modelowania topografii powierzchni narzędzi ściernych [8, 10, 13, 15, 17, 18] oraz powierzchni po obróbce ścierniej [5, 7, 8, 12, 14, 29, 30, 38] można wymienić prace opisujące wyniki badań nad zastosowaniem teorii fraktali, analiz częstości składowych, przekształceń falkowych, analiz statystycznych, analiz wywodzących się z teorii chaosu i katastrof. Większość wyników wykazuje ograniczoną przydatność i dość wąski zakres adekwatności lub wielką złożoność obliczeniową, z ograniczoną możliwością sterowania procesami generowania trójwymiarowego obrazu powierzchni i jego specyficznych cech.

To powoduje, że nadal poszukuje się prostych i uniwersalnych generatorów pozwalających na generowanie współrzędnych powierzchni o cechach statystycznie zgodnych z powierzchniami rzeczywistymi.

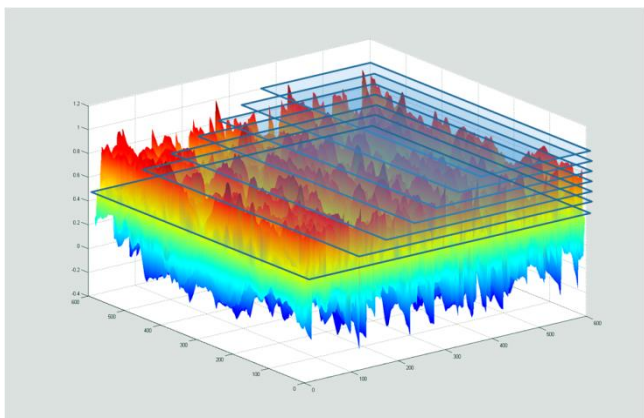
Podstawą opracowanego generatora były analizy opisane poniżej, uwzględniające potrzebę opracowania lepszych modeli do generowania obrazów powierzchni.

Tworzenie generatorów powierzchni technicznych jest potrzebne nie tylko dla doskonalenia modelowania i wizualizacji [1, 3, 8, 19, 20, 23, 35, 38], ale również dla tworzenia licznych zbiorów powierzchni, w celu rozszerzenia zakresu analiz i badań właściwości stereometrycznych, relacji między parametrami 2D i 3D oraz poszukiwania struktur stereometrycznych uważanych za korzystne w określonych zastosowaniach eksploatacyjnych [5, 16, 23,32, 34].

Znaczny postęp w metodach pomiaru i przetwarzania danych, charakteryzujących stereometrię powierzchni spowodował upowszechnienie analiz topografii powierzchni technicznych i wykorzystywanie ich wyników w ocenie jakości procesów obróbki oraz w ocenie jakości produktów i prognozowaniu ich właściwości eksploatacyjnych.

Struktura geometryczna powierzchni ma znaczny wpływ na współpracę i trwałość skojarzonych powierzchni, na odkształcenia, sztywność stykową i tłumienie drgań, wytrzymałość zmęczeniową, odporność na korozję, na szczelność połączeń, stykowe przewodnictwo ciepła, właściwości magnetyczne, zjawiska odbicia, pochłaniania i przenikania fal, na procesy nanoszenia, przyczepność i wytrzymałość powłok uszlachetniających, właściwości aero- i hydrodynamiczne, na subiektywne oceny dotyczące wyglądu.

Dobór parametrów oceny cech stereometrycznych powierzchni technicznych, takich, które mogą tworzyć komplementarny zbiór, zapewniać wysoką skuteczność klasyfikacyjną, a także łatwość interpretacji ocen i możliwość ich wykorzystania w decyzjach technologicznych, jest złożonym problemem (rys. 1).

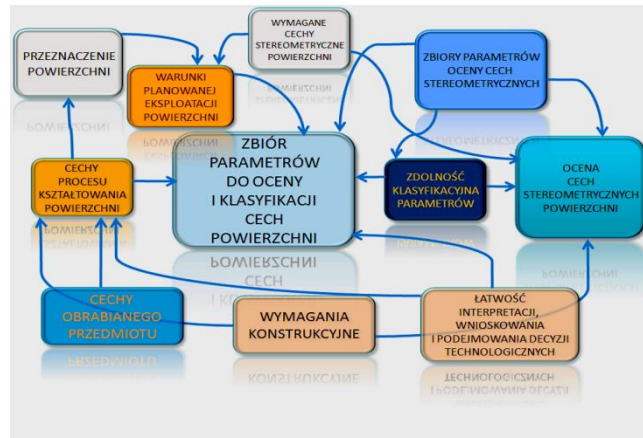


Rys. 1. Schemat do analizy cech wyniesień i obszarów możliwego kontaktu

Z analizy stanu wiedzy wynikają następujące wnioski:

1. Powierzchnia elementów materialnych nie jest wyłącznie obiektem geometrycznym, a zatem jej cechy powinny być oceniane bez pomijania cech fizycznych oraz ukształtowania i zmian podczas eksploatacji.
2. Podstawą wyboru parametrów, które byłyby przydatne do oceny określonej powierzchni, powinno być przeznaczenie elementu i warunki jego eksploatacji, z uwzględnieniem wiedzy o procesach stosowanych do kształtowania powierzchni.
3. Kształtowanie powierzchni wielu dokładnych elementów następuje w procesach obróbki ścierniej lub erozyjnej. Powierzchnie takie posiadają randomizowane cechy fraktalne zwłaszcza wyniesień nierówności.
4. Dla przydatności ocen powierzchni duże znaczenie ma łatwość interpretacji wartości parametrów i ich odniesienia do cech i efektów procesu kształtowania powierzchni.
5. Wiele parametrów chropowatości jest silnie skorelowanych dla pewnych klas powierzchni, a zawartość informacyjna poszczególnych parametrów jest zróżnicowana. Przydatność niektórych parametrów zwiększa się dopiero integracji z innymi parametrami.

6. Większość użytkowanych powierzchni przeznaczonych jest do współpracy z innymi powierzchniami, a zatem rozmieszczenie, rozmiary i cechy statystyczne potencjalnych pól kontaktu mają duże znaczenie (rys.2).
7. Nie jest uzasadnione wskazywanie jednego uniwersalnego zbioru parametrów, zalecanego do oceny cech stereometrycznych powierzchni o różnym przeznaczeniu, różnych funkcjach i zastosowaniach eksploatacyjnych.
8. Rozwój metod analizy i oceny powierzchni ukierunkowany jest na tworzenie zbiorów parametrów, które:
 - maksymalizują przydatność informacyjną,
 - spełniają warunek komplementarności,
 - zawierają informację o rozproszeniu i zmienności parametrów geometrycznych,
 - spełniają warunek łatwej interpretacji relacji, między wartościami parametrów, a określonymi cechami powierzchni,
 - umożliwią wyznaczenie ewentualnych korekt procesu kształtowania powierzchni.
9. W ocenie powierzchni o małej chropowatości za przydatny można uznać zbiór parametrów zależnych od: liczby wyniesień powyżej określonego poziomu, powierzchni i liczby wyniesień płaskich oraz relacji między ich cechami.
10. W tworzeniu syntetycznych wskaźników oceny powierzchni, z uwzględnieniem wielu parametrów elementarnych, niezbędna jest normalizacja wielkości wejściowych, a następnie wskazane jest wyznaczanie średniej geometrycznej, która w stosunku do średniej arytmetycznej w większym stopniu zależy od danych uznawanych za niekorzystne.



Rys. 2. Schemat do ilustracji problemów kompleksowej oceny cech stereometrycznych powierzchni technicznych

Metodyka generowania topografii powierzchni z wykorzystaniem randomizowanego kumulowania wartości składowych o różnym wymiarze fraktalnym

Podstawą opracowanego generatora topografii powierzchni były analizy opisane poniżej.

Dla danych:

- średnica ściernicy $D=200$ mm,
- wysokość ściernicy $H=40$ mm,
- odległość ziaren na powierzchni ściernicy $l_z=0,25$ mm,
- posuw poprzeczny $a_p=2$ mm,
- udział ziaren aktywnych w całkowitej liczbie ziaren na powierzchni $u_{za}=0,05$,

- średnia długość śladów tworzonych przez poszczególne ziarna $L_s=2$ mm,
- średnia szerokość śladu $b_s=0,025$ mm,
- w szlifowaniu powierzchni przedmiotu o długości $L_p=100$ mm, szerokości $b_p=40$ mm, z prędkością szlifowania $v_s=30$ m/s i prędkością posuwu wzdłużnego przedmiotu $v_{fz}=1$ m/s,
- szlifowanie bez przejścia wyiskrzającego,

otrzymuje się:

- czas szlifowania powierzchni przedmiotu ($4\ 000\ \text{mm}^2$) $t_s=2$ s,
- powierzchnia aktywna ściernicy w tym czasie $P_{as}=2\ 400\ 000\ \text{mm}^2$
- liczba ziaren aktywnych w czasie $t=2$ s, $L_{za}=640\ 000$ – uwzględniając malejący udział ziaren aktywnych w kolejnych strefach powierzchni ściernicy o szerokości $a_p=2$ mm,
- rzut na płaszczyznę nominalną przedmiotu średniej powierzchni śladu tworzonego przez ziarna $p_s=0,05\ \text{mm}^2$,
- liczba śladów na powierzchni przedmiotu odniesiona do średniej powierzchni śladu – liczba kontaktów ziaren w obrębie jednego śladu obróbkowego – 8.

Z określonej powyżej liczby kontaktów ziaren przypadających na średnią powierzchnię śladu w szlifowaniu płaszczyn z posuwem poprzecznym część wywołuje pogłębienie lub poszerzenie śladów wcześniejszych, a większość skutkuje obniżeniem wyniesień pozostałych na powierzchni.

Dna śladów są dość gładkie, z niewielką zmiennością zagłębień [11] odpowiadającą cyklicznym (0,1...4 MHz) przemieszczeniom cienkich (0,001 ... 0,010 mm) warstw materiału. Brzegi śladów, które zazwyczaj kilkakrotnie będą jeszcze kształtowane przez inne ziarna, są wypływkami o nieregularnej grani, często nieciągłej.

Z powyższych danych wynikają wnioski dotyczące modelowania powierzchni po szlifowaniu z wykorzystaniem metod fraktalnych:

- w większości prac fraktale traktuje się jako obiekty, które można poprzez dobór ich parametrów dopasować do opisu topografii określonej powierzchni, poszukując odpowiedniego wymiaru fraktalnego [2, 3, 4, 6, 24, 26] – takie podejście może być uzasadnione jedynie w takich przypadkach, gdy mechanizm kształtowania wgłębień i wyniesień nierówności jest podobny,
- stosowanie nawet zaawansowanych metod matematycznych do opisu cech powierzchni bez analizy procesów jej kształtowania prowadzi do poszukiwania dopasowania opisu do rzeczywistości zgodnego dla średnich wartości cech, bez wystarczającej dokładności opisu innych cech, ważnych dla eksploatacji powierzchni, zwłaszcza elementów łożysk, uzębień, uszczelnień, układów optycznych, pomiarowych, a także stosowanych w innych zastosowaniach mikroinżynierii.

Uwzględniając wiedzę o procesach kształtowania powierzchni w procesach szlifowania można sformułować następujące założenia do modelowania topografii powierzchni i jej opisu z wykorzystaniem metodyki fraktalnej:

- powierzchnie wyniesień są kształtowane poprzez usuwanie z nich coraz mniejszych warstw materiału,
- podobieństwo mikronierówności do nierówności powierzchni w większym stopniu występuje na wzniesie-

niach, co wynika ze sposobu formowania grani wypływek oraz przenikania się zboczy sąsiadujących nierówności,

- prawdopodobieństwo pogłębienia lub poszerzenia den wgłębień jest małe,
- wgłębienia nierówności są kształtowane poprzez usuwanie materiału i udział składowych o wyższych częstościach jest znacznie mniejszy w porównaniu do powierzchni wyniesień po obu stronach śladu obróbkowego,
- mechanizm fraktalnej kumulacji składowych o coraz wyższym wymiarze fraktalnym, coraz mniejszej autokorelacji i mniejszej wysokości nierówności, dotyczyć powinien w większym stopniu wyniosłości powierzchni, a w mniejszym wgłębień,
- nie jest uzasadnione poszukiwanie korelacji między sumarycznym wymiarem fraktalnym powierzchni a innymi parametrami charakteryzującymi jej cechy stereometryczne, gdyż sumaryczny wymiar fraktalny, będący kumulacją pewnej liczby składowych, odpowiednio do kolejnych oddziaływań ziaren na wcześniej ukształtowaną powierzchnię przez inne ziarna, może osiągać tę samą wartość poprzez różne kombinacje składowych,
- parametrem właściwym do fraktalnego charakteryzowania powierzchni może być wymiar fraktalny obejmujący na przykład trzy główne składowe, jako średnia geometryczna ich wartości.

Geometria fraktalna poprzez jej uniwersalność i zwięzłość zapisu oraz znaczny zakres analogii do różnych procesów, staje się często stosowaną metodą opisu topografii powierzchni. Często jednak stosowana jest w sposób nadmiernie uproszczony, co daje nie zawsze wystarczającą poprawność opisów, a to uzasadniane bywa niedoskonałością metody, choć zazwyczaj jest niedoskonałością modelu.

Znana cecha samopodobieństwa fraktali umożliwia ich opis za pomocą jednego parametru D , będącego liczbą rzeczywistą. Samopodobieństwo jest cechą związaną z równością skal w każdym kierunku. Powierzchnie techniczne dla zapewnienia samopodobieństwa (powierzchnie samoafiniczne) wymagają zróżnicowania powiększeń pionowych i poziomych. Powierzchnie po obróbce ścierną są multifraktalne, jednak po szlifowaniu, co podkreślono powyżej powierzchnie nie są prostą addytywną kumulacją składowych o różnych wymiarach fraktalnych, lecz są kumulacją odnoszącą się w różnym stopniu do wzniesień i wgłębień powierzchni.

Nie jest słuszny podział powierzchni na zgodne z geometrią fraktalną lub niezgodne w zależności od stopnia losowości procesów [26], gdyż wśród procesów uznawanych za losowe penetracja oddziaływań w obrabianej warstwie jest inna w docieraniu, obróbce elektroerozyjnej, inna w polerowaniu i jeszcze inna w szlifowaniu.

Autorzy prac [16, 37] słusznie uważają, że powierzchnie po obróbce elektroiskrowej, cięciu strumieniami cieczy i azotowaniu jonowym są fraktalne. W wielu pracach [24, 36, 38] wyrażono pogląd, że powierzchnie po szlifowaniu również są fraktalne. Można się z tym zgodzić tylko, co do ogólnego założenia modelowania, bowiem autorzy niniejszej pracy wskazują na złożony mechanizm kumulacji składowych fraktalnych o różnych wymiarach fraktalnych, odpowiadających poszczególnym fazom kształtowania szlifowanych powierzchni. Nie są to zatem proste relacje między wymiarem fraktalnym, a innymi cechami powierzchni.

Tab. 1. Warunki szlifowania powierzchni zastosowanych do testowania algorytmu do modelowania topografii powierzchni po procesie szlifowania z zastosowanym mechanizmów kumulacji składowych o różnym wymiarze fraktalnym

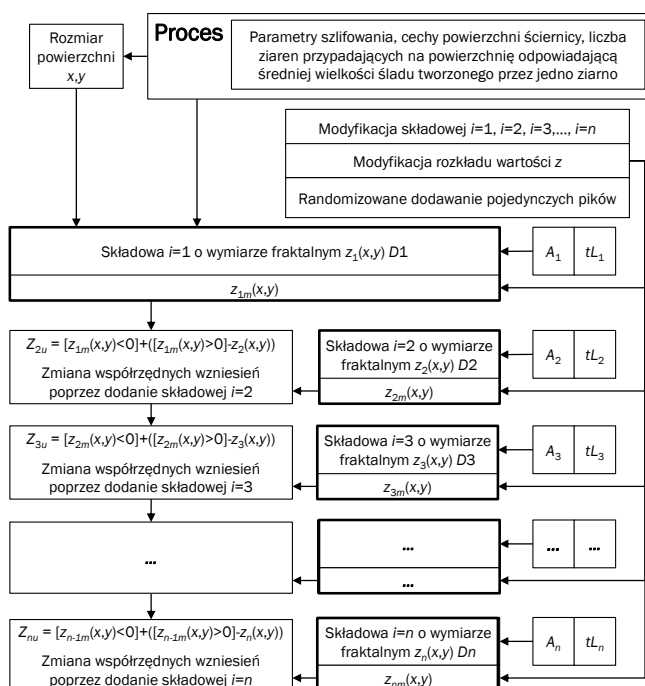
Lp.	Warunki szlifowania powierzchni			Oznaczenie powierzchni		
				O1	O2	O3
	Opis	Symbol	Jedn.	Wartość		
1.	Prędkość szlifowania	v_s	m/s	35		
2.	Prędkość wzdłużna przedmiotu	v_{ft}	m/min	25		
3.	Posuw poprzeczny	a_p	mm/skok	0,5		
4.	Dosuw	a_e	μm	100		
5.	Oznaczenie ściernicy	-	-	99A100K7VTE10-35	99A100K7IVTE10-35	99A120K7VE01
6.	Materiał szlifowany	-	-	X153CrMoV12 (NC11LV)		INCONEL® 718

W pracy [26] zawarto klasyfikację metod fraktalnego opisu powierzchni. Często stosowana jest metoda wykorzystująca funkcję gęstości widmowej mocy [23] i funkcję struktury [23, 25].

W wielu pracach przytaczane jest równanie Weierstrassa-Maldenbrota (W-M), przydatne do charakterystyki profili samoafinicznych powierzchni chropowatych [2]:

$$Z(x) = G^{D-1} \sum_{n=n_1}^{\infty} \frac{\cos(2\pi\gamma^n x)}{\gamma^{(2-D)n}} \quad (1)$$

W którym $1 < D < 2$ jest wymiarem fraktalnym, G jest parametrem skali, L jest odcinkiem pomiarowym, zaś $\gamma > 1$, przy czym $\gamma^{n_1} = 1/L$.



Rys. 3. Schemat do analizy algorytmu do modelowania topografii powierzchni po procesie szlifowania z zastosowaniem mechanizmów kumulacji składowych o różnym wymiarze fraktalnym

W oszacowaniach relacji między wymiarem fraktalnym profilu D , a wymiarem fraktalnym powierzchni D_s izotropowej można przyjąć $D_s = D + 1$. Analiza wymiaru fraktalnego powierzchni jest dość złożona i znanych jest wiele miar pośrednich. Większość z nich jednak nie uwzględnia charakteru procesu, a prezentuje podejście czysto geometryczne, co prowadzi do znacznych niedokładności. W opracowanym algorytmie mechanizm randomizowanej kumulacji składowych nierówności o różnym wymiarze fraktalnym, uwzględnia (typowe dla procesu szlifowania) modyfikowanie przez kolejne składowe w większym stopniu wzniesień powierzchni, a w mniejszym jej wgłębień.

Whitehouse [33] słusznie ostrzega przed uproszczonym stosowaniem opisu fraktalnego, co było inspiracją dla autorów niniejszej pracy do opracowania mechanizmu kumulacji składowych powierzchni, charakteryzujących się różnym wymiarem fraktalnym, integrowanych zgodnie z cechami procesu.

Wyniki modelowania

Na rysunku 3 przedstawiono schemat algorytmu do modelowania topografii powierzchni po procesie szlifowania z zastosowaniem mechanizmów kumulacji składowych o różnym wymiarze fraktalnym, różnej amplitudzie A_i oraz różnych długości funkcji autokorelacji tL_i .

Tab. 2. Wykaz parametrów 3D zastosowanych do oceny struktury stereometrycznej powierzchni rekonstruowanych

Lp.	Symbol	Jedn.	Kontekst	Opis
1.	Sa	μm		Średnie odchylenie arytmetyczne
2.	Sbi	-		Wskaźnik nośności powierzchni
3.	Sci	-		Wskaźnik retencji płynu rdzenia
4.	Sdc	μm	$p = 10\%$, $q = 80\%$	Różnica wysokości między przekrojami
5.	Sfd	-		Wymiar fraktalny powierzchni
6.	Sku	-		Kurtoza (eksczes) powierzchni
7.	Smc	μm	$p = 10\%$	Odwrotny połowy stosunek materiałowy powierzchni
8.	Smr	%	$c = 1 \mu\text{m}$ pod najwyższym wierzchołkiem	Względny udział materiałowy powierzchni
9.	Sp	μm		Maksymalna wysokość wzniesień
10.	Sq	μm		Średniokwadratowe odchylenie powierzchni
11.	Ssk	-		Asymetria powierzchni
12.	Sv	μm		Maksymalna głębokość wgłębień
13.	Svi	-		Wskaźnik retencji płynu przez doliny
14.	Sxp	μm	$p = 50\%$, $q = 97,5\%$	Skrajna wysokość wierzchołka
15.	Sz	μm		Największa wysokość nierówności

Warunki szlifowania powierzchni rzeczywistych

Warunki w jakich wykonano powierzchnie rzeczywiste, (O1-O3), które zostały użyte do przedstawienia rezultatów modelowania topografii powierzchni po procesie szlifowania z zastosowaniem mechanizmów kumulacji składowych o różnym wymiarze fraktalnym zestawiono w tabeli 1.

Analizy struktury stereometrycznej powierzchni szlifowanych przeprowadzono z zastosowaniem systemu pomiarowego Talysurf CCI 6000 firmy Taylor Hobson oraz systemu opracowanego w Katedrze Mechaniki Precyzyjnej do oceny struktury geometrycznej powierzchni po obróbce ścierniej [14].

Tab. 3. Parametryczne zestawienie rezultatów modelowania

Lp.	Symbol	O1				
		O1	R1 ₁	B1 ₁	R1 ₂	B1 ₂
1.	Sa	0,070	0,070	0,26%	0,071	-0,73%
2.	Sbi	0,437	0,433	0,97%	0,430	1,63%
3.	Sci	1,254	1,284	-2,40%	1,265	-0,89%
4.	Sdc	0,168	0,171	-1,41%	0,170	-1,25%
5.	Sfd	2,631	2,845	-8,13%	2,839	-7,92%
6.	Sku	5,129	5,049	1,56%	5,199	-1,36%
7.	Smc	0,104	0,114	-9,36%	0,113	-8,68%
8.	Smr	100	100	0,00%	100	0,00%
9.	Sp	0,342	0,369	-7,91%	0,373	-8,89%
10.	Sq	0,093	0,098	-5,75%	0,099	-6,77%
11.	Ssk	-0,973	-0,937	3,74%	-0,986	-1,30%
12.	Sv	0,573	0,531	7,33%	0,528	7,87%
13.	Svi	0,162	0,187	-15,0%	0,188	-15,8%
14.	Sxp	0,235	0,261	-11,3%	0,265	-12,7%
15.	Sz	0,915	0,900	1,63%	0,900	1,60%
Lp.	Symbol	O2				
		O2	R2 ₁	B2 ₁	R2 ₂	B2 ₂
1.	Sa	0,113	0,111	1,49%	0,112	0,65%
2.	Sbi	0,465	0,431	7,33%	0,436	6,24%
3.	Sci	1,333	1,350	-1,30%	1,350	-1,29%
4.	Sdc	0,282	0,281	0,52%	0,279	0,99%
5.	Sfd	2,695	2,868	-6,41%	2,866	-6,36%
6.	Sku	3,596	3,832	-6,56%	3,858	-7,30%
7.	Smc	0,171	0,176	-3,03%	0,176	-3,07%
8.	Smr	99,671	99,248	0,42%	99,283	0,39%
9.	Sp	0,521	0,557	-6,98%	0,562	-7,94%
10.	Sq	0,144	0,146	-1,44%	0,148	-2,98%
11.	Ssk	-0,583	-0,589	-1,17%	-0,568	2,44%
12.	Sv	0,745	0,684	8,17%	0,683	8,26%
13.	Svi	0,145	0,156	-7,77%	0,161	-11,1%
14.	Sxp	0,343	0,346	-0,86%	0,363	-5,84%
15.	Sz	1,266	1,241	1,94%	1,245	1,60%
Lp.	Symbol	O3				
		O3	R3 ₁	B3 ₁	R3 ₂	B3 ₂
1.	Sa	0,185	0,171	7,37%	0,177	4,24%
2.	Sbi	0,427	0,420	1,64%	0,384	10,1%
3.	Sci	1,191	1,282	-7,64%	1,290	-8,29%
4.	Sdc	0,434	0,406	6,50%	0,419	3,49%
5.	Sfd	2,642	2,813	-6,48%	2,810	-6,37%
6.	Sku	5,900	6,106	-3,49%	6,207	-5,20%
7.	Smc	0,269	0,273	-1,49%	0,281	-4,29%
8.	Smr	70,793	70,893	-0,14%	49,962	29,4%
9.	Sp	0,908	0,937	-3,18%	1,033	-13,8%
10.	Sq	0,247	0,245	0,85%	0,255	-3,24%
11.	Ssk	-1,138	-1,069	6,05%	-1,036	8,94%
12.	Sv	1,895	1,708	9,85%	1,660	12,4%
13.	Svi	0,167	0,190	-13,8%	0,189	-13,3%
14.	Sxp	0,621	0,655	-5,50%	0,688	-10,7%
15.	Sz	2,803	2,645	5,63%	2,694	3,90%

■ Parametry do oceny SGP

Do oceny struktury geometrycznej powierzchni po rekonstrukcji zastosowano parametry amplitudowe (Sa, Sku, Sp, Sq, Ssk, Sv, Sz), parametry pola i objętości (Sdc, Smr),

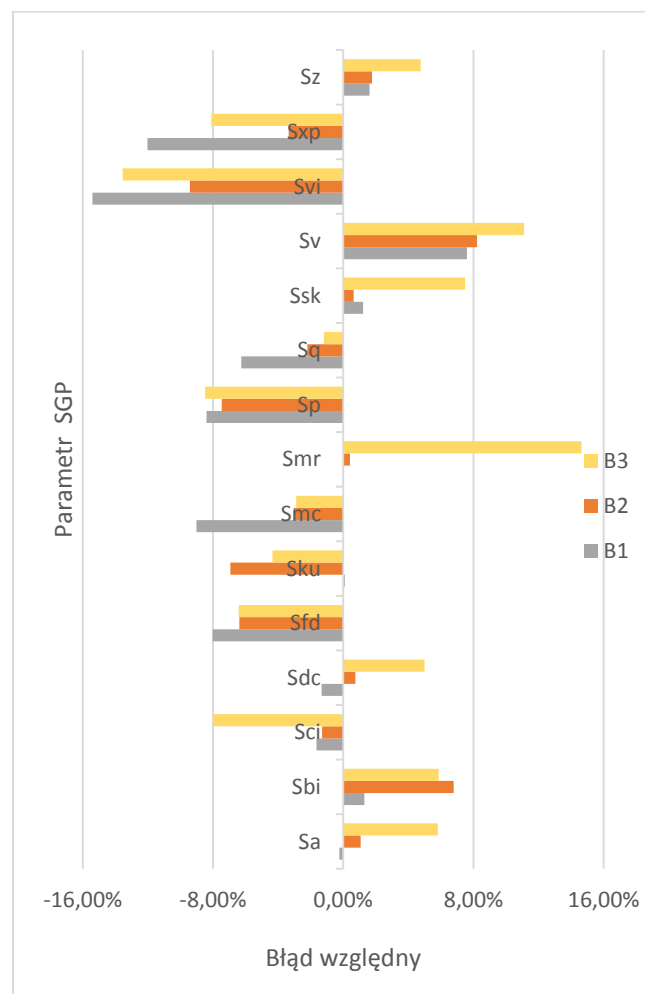
parametry funkcyjne (Smc, Smr, Sxp), indeksy funkcyjne (Sbi, Sci, Svi) oraz parametr hybrydowy Sfd, który jest wymiarem fraktalnym powierzchni. Szczegółowy opis parametrów zastosowanych do oceny rekonstruowanych powierzchni względem powierzchni oryginalnych zestawiono w tabeli 2.

■ Zestawienie rezultatów modelowania

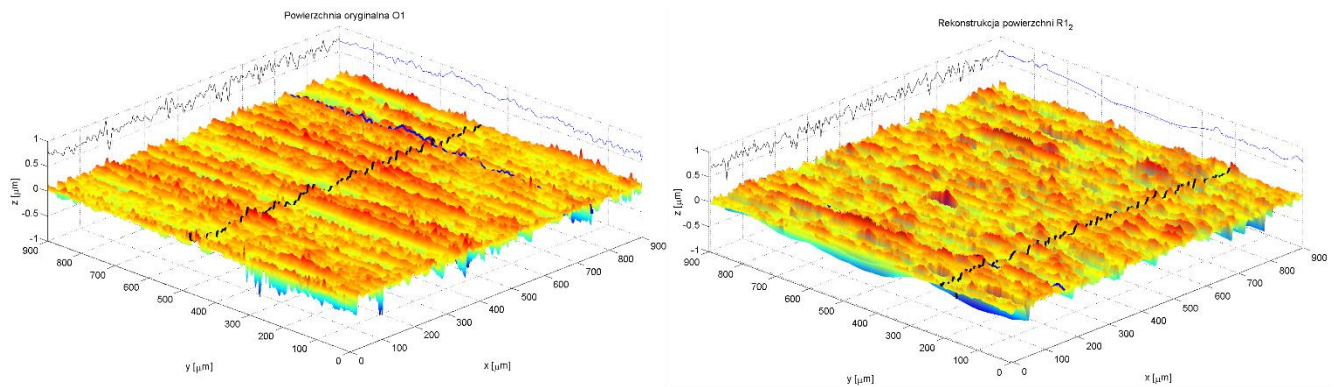
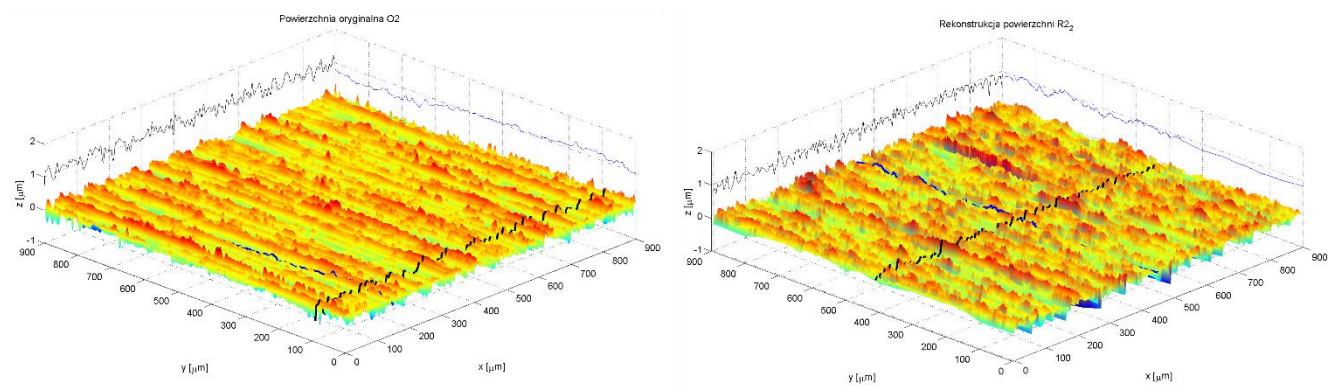
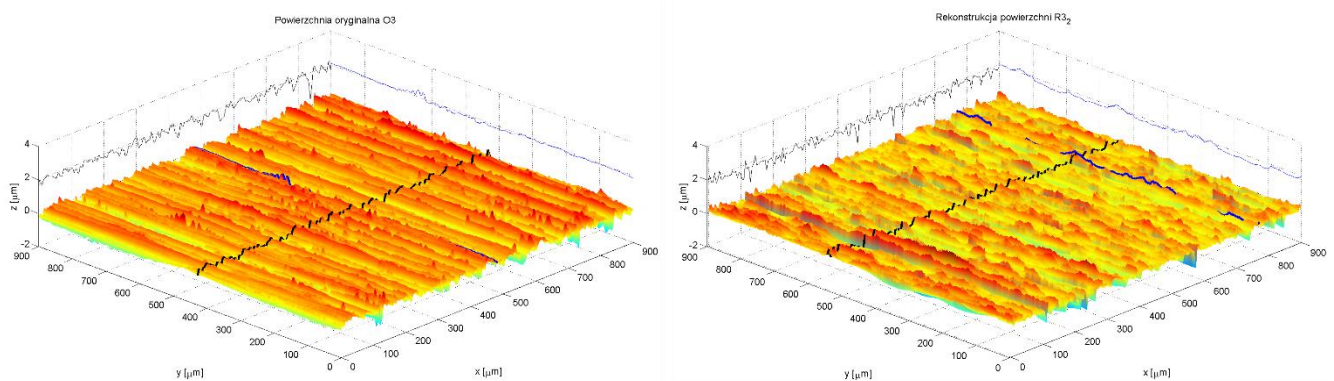
Wartości parametrów dla powierzchni oryginalnych (O_i) oraz dla powierzchni zrekonstruowanych (R_{ij}) zestawiono w tabeli 3. W tabeli przedstawiono również procentowe wartości błędów względnych (B_{ij}), gdzie zmienna *i* określa numer powierzchni rekonstruowanej a *j* kolejny indeks rekonstrukcji.

Wartości błędów względnych (B_{ij}) parametrów oceny SGP dla każdej powierzchni *i* zostały uśrednione oraz przedstawione na wykresie (rys. 4.).

Uśredniony błąd względny dla analizowanych powierzchni dla prawie wszystkich porównywanych parametrów nie przekracza 10%. Największy błąd względny dla wszystkich rekonstruowanych powierzchni występuje dla parametru Svi. Średni błąd względny dla wymiaru fraktalnego powierzchni Sfd nie przekracza 8%.



Rys. 4. Średni błąd względny dla analizowanych parametrów

Rys. 5. Wizualizacja powierzchni rzeczywistej $O1$ oraz modelowej $R1_2$ Rys. 6. Wizualizacja powierzchni rzeczywistej $O2$ oraz modelowej $R2_2$ Rys. 7. Wizualizacja powierzchni rzeczywistej $O3$ oraz modelowej $R3_2$

Na rysunkach 5-7 przedstawiono wizualizację powierzchni rzeczywistych wraz z powierzchniami modelowymi.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono metodykę oraz wyniki modelowania topografii powierzchni po procesie szlifowania z zastosowaniem mechanizmów kumulacji składowych o różnym wymiarze fraktalnym. Wykazano zgodność powierzchni rzeczywistej z powierzchniami modelowymi poprzez porównanie 15 parametrów do oceny struktury stereometrycznej powierzchni. Wyniki pracy stanowią podstawę do sprawnego generowania topografii powierzchni po obróbce ścierniej z wykorzystaniem informacji o parametrach i warunkach procesu.

Badania zrealizowano w ramach projektu:



Projekt "Innowacyjne, hybrydowe narzędzia ściernie do obróbki stopów metali lekkich" realizowany w ramach programu "INNOTECH" w ścieżce programowej IN-Tech Nr umowy: INNOTECH-k3/IN3/43/229135/NCBR/14 współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

LITERATURA

1. Bakolas V., Numerical generation of arbitrarily oriented non-Gaussian three-dimensional rough surfaces, *Wear* 254 (2003) 546–554.
2. Berry M.V., Z.V. Lewis, On the Weierstrass–Mandelbrot fractal function, *Proc. R. Soc. A* 370 (1980) 459–484.
3. Burrows J.M., B.J. Griffiths: A vector modelling technique for the representation of 3-dimensional surface topography. *Materiały 7-ej Międzynarodowej Konferencji „Metrology and Properties of Engineering Surfaces”, Gothenburg, Szwecja, 1997, 133-138*
4. Cai Z.J., D.Q. Chen, S. Lu, Reconstruction of a fractal rough surface, *Physica D* 213 (2006) 25–30.
5. Chen M., Pang Q., Wang J., Kai Ch.: Analysis of 3D microtopography in machined KDP crystal surfaces based on fractal and wavelet methods, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48 (2008) 905–913.
6. Guiyun Zhou, Nina.S., Lam N.: A comparison of fractal dimension based on multiple surface generation algorithms, *Computers & Geosciences* 31, 2005, 1260–1269.
7. Kacalak W. Szafraniec F., Tomkowski R. Lipiński D. Łukianowicz Cz., *Metodyka oceny zdolności klasyfikacyjnej parametrów charakteryzujących cechy stereometryczne nierówności powierzchni, Pomiar Automatyka Kontrola, Vol. 57, 2011, str. 542-546.*
8. Kacalak W., Szafraniec F., Kunc R., Remelska H.: Zastosowanie teorii fraktali do tworzenia i wizualizacji powierzchni o określonej topografii. Rozdział w monografii *PODSTAWY I TECHNIKA OBRÓBKI ŚCIERNEJ*. Łódź, 2010.
9. Kacalak W., Szafraniec F., Lipiński D.: Probabilistyczna analiza aktywności ziaren na czynnej powierzchni ściernicy. *Miesięcznik Naukowo-Techniczny MECHANIK, nr 8-9/2014, str. 176-184.*
10. Kacalak W., Szafraniec F., Tomkowski R., *Metodyka modelowania powierzchni ziaren określonych materiałów ściernych, INNOVATIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY 2, Kraków 2012, str. 555-562.*
11. Kacalak W., Tandecka K., Budowa mikrowiórów oraz skutki mikro-nieciągłości ich tworzenia w procesach wygładzania powierzchni z zastosowaniem folii ściernych, *INNOVATIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY 2, Kraków 2012, str. 181-192.*
12. Kacalak W., Tandecka K., Podstawy prognozowania cech stereometrycznych powierzchni wygładzanych z zastosowaniem folii ściernych, *INNOVATIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY 2, Kraków 2012, str. 563-577.*
13. Kacalak W., Tandecka K.: Metrologiczne aspekty oceny topografii diamentowych folii ściernych do precyzyjnego mikrowygładzania. *Pomiary Automatyka Kontrola, 5/2011.*
14. Kacalak W., Tomkowski R., Lipiński D., Szafraniec F.: System oceny struktury geometrycznej powierzchni po obróbce ściernej. *Miesięcznik Naukowo-Techniczny MECHANIK, nr 8-9/2014, str. 219-226.*
15. Kacalak W.: Metoda generowania ziaren ściernych i tworzenia topografii czynnej powierzchni ściernicy, *Praca niepublikowana.*
16. Karpiński T., C. Łukianowicz, T. Łukianowicz: Skomputeryzowane stanowisko do pomiaru i analizy profilu powierzchni. *VIII Konferencja Naukowo-Techniczna: Metrologia w Technikach Wytwarzania Maszyn, Szczecin '99, 251-258*
17. Lipiński D., Kacalak W., Tomkowski R., Methodology of evaluation of abrasive tools' wear with the use of laser scanning, *Proceedings of the International Conference on Surface Metrology, 2012, France, pp.: 72-78.*
18. Lipiński D., Kacalak W., Tomkowski R., Methodology of evaluation of abrasive tool wear with the use of laser scanning microscopy, *SCANNING, 2013 (DOI:0.1002/sca.21088).*
19. Majumdar A., C.L. Tien, Fractal characterization and simulation of rough surfaces, *Wear* 136 (1990) 313–327.
20. Mihailidis A., Bakolas V., Numerical simulation of real 3-D rough surfaces, *J. Balk. Tribol. Assoc.* 5 (1999) 247–255.
21. Patrikar R.M., Modeling and simulation of surface roughness, *Appl. Surf. Sci.* 228 (2004) 213–220.
22. Pawlus P., Simulation of stratified surface topography. *Wear* 2008;264(5–6):457–463.
23. Pawlus P., Topografia powierzchni: pomiar, analiza, oddziaływanie. Rzeszów 2005.
24. Poljacek S.M., Risovic D., Furic K., M. Gojo M.: Comparison of fractal and profilometric methods for surface topography characterization, *Applied Surface Science* 254 (208) 3449-3458.
25. Roques-Carnes C., N. Bodin, G. Monteil, J.GF. Quinou: Description of rough surfaces using conformal equivalent structure concept. Part 2. Numerical approach. *Wear* 248 (2001), 92-99.
26. Russ J.C., *Fractal Surfaces*, first ed., Springer, 1994, 320pp.
27. Stach S., Cybo J., Chmiela J.: Fracture surface — fractal or multifractal?, *Materials Characterization* 26 (2001) s.163– 167.
28. Stachowiak G.W., Posiadło P.: *Classification of tribological surfaces, Tribology International, 2004.*
29. Tomkowski R., Kacalak W., Lipiński D., Evaluation of the surface topography after precision machining, *Journal of Machine Engineering, 2012; 12(4), 71-79.*
30. Tomkowski R., Kacalak W., Lipiński D., Methodology of evaluation of extra smooth surfaces with the use of new evaluation parameters, *Proceedings of the International Conference on Surface Metrology, 2012, France, pp.: 64-71.*
31. Wang A.L., Yang C.X., Yuan X.G.: Evaluation of wavelet transform method for machine surface topography 2: fractal characteristic analysis, *Tribology International* 36, 2003, 527-535.
32. Whitehouse D.J., The generation of two-dimensional random surfaces having a specified function, *Ann. CIRP* (1983) 495–498.
33. Whitehouse D.J.: Fractal or fiction. *Wear* 249, 2001, 345-353
34. Whitehouse D.J.: Some theoretical aspects of a practical measurement problem in plateau honing. *Int. J. Prod. Res.* 1983, 21/2, pp. 215-221.
35. Wu J.J., Simulation of rough surfaces with FFT, *Tribol. Int.* 33 (2000) 47–58.
36. Wu J.-J.: Characterization of fractal surfaces. *Wear* 239, 2000, 36-47
37. Yuan C.Q., Li J., Yan X.P., Peng Z.: The use of the fractal description to characterize engineering surfaces and wear particles, *Wear* 255, 2003, 315-326.
38. Zhang Y., Luo Y., Ji Feng Wang, Zhu Li, Research on the fractal of surface topography of grinding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 41, 2001, 2045-2049.