

# Ocena wpływu gęstości próbkowania poziomego na proces dekompozycji falkowej

## Evaluation of the impact of the horizontal sampling density on the wavelet analysis process

WŁODZIMIERZ MAKIEŁA  
DAMIAN GOGOLEWSKI\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.1.4>

Oceniono znaczenie gęstości próbkowania poziomego oraz poziomu dekompozycji falkowej w aspekcie zastosowania poszczególnych funkcji falkowych do podziału badanego profilu pierwotnego na składowe nierówności powierzchni. Pomiaru profili powierzchni wykonano za pomocą profilometru stykowego, z określoną gęstością próbkowania. Analizie poddano dwa typy powierzchni: wytworzoną techniką przyrostową oraz po obróbce szlifowaniem.

**SŁOWA KLUCZOWE:** analiza falkowa, filtracja, chropowatość powierzchni, gęstość próbkowania poziomego

*The paper assesses the impact of horizontal sampling density and level of wavelet decomposition in the aspect of applying mother wavelet to divide components of surface texture. Measurements of surface profiles were made using a contact profilometer applying a specific sample density. Two types of surfaces were prepared: using additive technology and grinding. KEYWORDS: wavelet analysis, filtration, surface roughness, horizontal sampling density*

Kontrola jakości struktury geometrycznej powierzchni elementów części maszyn jest nieodłącznym etapem każdego procesu wytwarzania. Rozwój metod numerycznych i technik komputerowych spowodował, że do diagnostyki procesu wykorzystuje się coraz bardziej złożone narzędzia, pozwalające na pozyskiwanie istotnych informacji o badanym sygnale – nawet w skomplikowanych modelach, których analiza wymaga dużej mocy obliczeniowej. Klasyczne metody analizy sygnałów pomiarowych coraz częściej są zastępowane przez nowe algorytmy przetwarzania danych. Przykładem może być rozwinięta na przełomie XX i XXI w. transformata falkowa, którą ostatnio wielu badaczy zaczęło wykorzystywać do analizy sygnałów struktury geometrycznej powierzchni [1–7].

Jiang oraz Blunt [1] wykorzystali falki zespolone do wykrycia niewielkich, ale istotnych cech powierzchni. W pracy [2] autorzy zastosowali transformatę falkową do analizy powierzchni swobodnych, Chen i in. [3] – do analizy wymiaru fraktalnego i trójwymiarowych sygnałów struktury geometrycznej powierzchni, a Zawada-Tomkiewicz [4] – do analizy obrazów powierzchni. Dutta i in. [5] zastosowali dwuwymiarową transformatę falkową do dekompozycji powierzchni po toczeniu, aby zbadać zużycie narzędzia, Zahouani i in. [6] – do badań związanych z analizą wielkoskalową, a Josso i in. [7] – do scharakteryzowania powierzchni i jej podziału na składowe.

Wstępna analiza możliwości zastosowania transformaty falkowej do rozdzielania składowych nierówności powierzchni [8] wykazała, że należy rozważyć poszczególne parametry przekształcenia falkowego, tj. kształt falki bazowej, poziom dekompozycji i gęstość próbkowania poziomego. Gęstość próbkowania poziomego odgrywa istot-

ną rolę w pomiarach struktury geometrycznej powierzchni – ma bezpośredni wpływ na wyniki analizy [9].

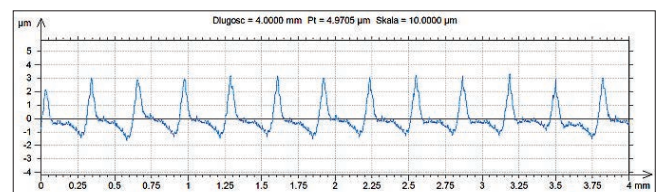
### Metodyka badań

Badania przeprowadzono dla dwóch typów powierzchni. Analizie poddano powierzchnię stali C45 po szlifowaniu obwodowym oraz powierzchnię stali 316L, otrzymaną w wyniku zastosowania przyrostowej techniki wytwarzania SLM (*selective laser melting*).

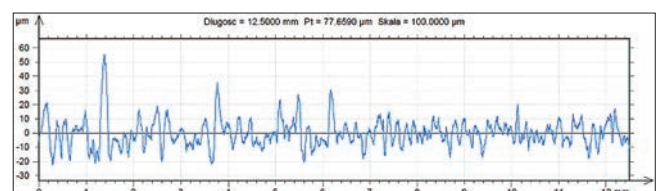
Za pomocą profilometru stykowego Form Talysurf PGI 1200 wykonano pomiary trzech profili powierzchni próbek z określoną gęstością punktów pomiarowych. Pomiar każdego profilu przeprowadzono tak, aby uzyskać 4000, 8000 i 32 000 punktów na odcinku pomiarowym. Otrzymane profile poddano analizie z wykorzystaniem filtru Gaussa o określonej długości odcięcia (*cut-off*): w przypadku profili powierzchni szlifowanej stosowano filtr  $\lambda_c = 0,8$  mm, a w przypadku profilu powierzchni próbki wytworzonej techniką przyrostową – filtr  $\lambda_c = 2,5$  mm. Otrzymane w wyniku filtracji profile chropowatości porównano z zarysami powstałymi w wyniku zastosowania dyskretnej transformaty falkowej. Poszczególne profile pierwotne analizowano z wykorzystaniem wybranych falek bazowych.

Na podstawie badań wstępnych wytypowano falki: db20, coif4, sym6. Dla każdej próbki na kolejnych poziomach dekompozycji wyznaczono współczynnik zgodności Pearsona zarysu otrzymanego po filtracji falkowej oraz po filtracji z użyciem filtru Gaussa. Przyjęto, że profil chropowatości powierzchni powstałej w wyniku zastosowania wybranych funkcji falkowych będzie definiowany jako suma zarysów detali otrzymanych do określonego poziomu analizy. Ponadto porównano wybrane parametry chropowatości profili:  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$ ,  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$ ,  $R_{Sm}$ .

Na rys. 1 i 2 pokazano przykładowe profile powierzchni, uzyskane w wyniku pomiaru z zadaną gęstością próbkowania (32 000 punkty pomiarowe) oraz po zastosowaniu filtracji Gaussa.



Rys. 1. Profil chropowatości powierzchni szlifowanej; filtr Gaussa  $\lambda_c = 0,8$  mm



Rys. 2. Profil chropowatości powierzchni wytworzonej techniką druku 3D; filtr Gaussa  $\lambda_c = 2,5$  mm

\* Dr hab. inż. Włodzimierz Makiela, prof. PŚk (wmakiela@tu.kielce.pl); dr inż. Damian Gogolewski (dgogolewski@tu.kielce.pl) – Politechnika Świętokrzyska

## Wyniki obliczeń

Zastosowanie różnych metod wytwarzania determinowało zmienność rozkładu nierówności poszczególnych profili powierzchni. Zbadano więc wpływ gęstości próbkowania poziomego na proces dekompozycji falkowej.

Wyznaczone wartości współczynnika korelacji Pearsona zarysów dla próbki szlifowanej przedstawiono na rys. 3. Analogiczne obliczenia przeprowadzono dla próbki wykonanej techniką przyrostową (rys. 4). Na rysunkach zaznaczono obliczone średnie wartości parametru korelacji dla trzech profili powierzchni wraz z wyznaczonymi przedziałami ufności (przyjęto  $\alpha = 0,05$ ).

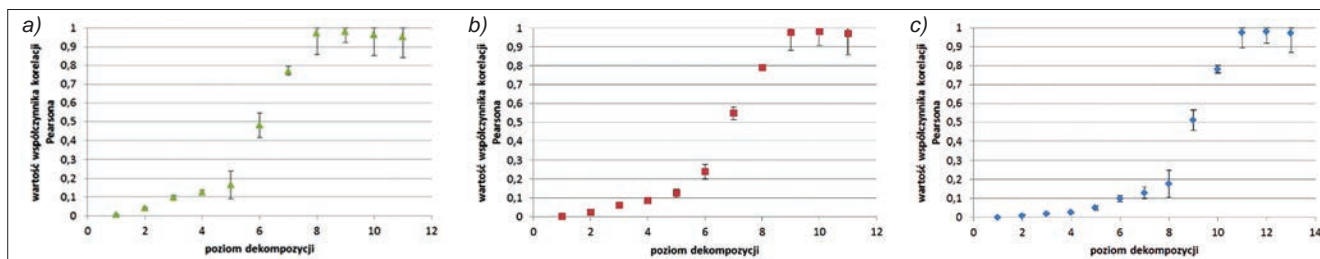
Otrzymane wartości, odnoszące się do początkowych etapów analizy, wskazują na brak związku między badanymi zarysami. Jednakże na kolejnych poziomach dekompozycji wartość współczynnika wzrasta. Zarys, który uzyskano w wyniku sumowania zarysów detali powstałych w trakcie analizy profili pierwotnych z wykorzystaniem jednowymiarowej dyskretnej transformaty falkowej, osiąga największy współczynnik zgodności z sygnałem powstałym po przeprowadzeniu filtracji Gaussa – na poziomie (w zależności od odstępów próbkowania): dziewiątym ( $\Delta x = 1 \mu\text{m}$ ), dziesiątym ( $\Delta x = 0,5 \mu\text{m}$ ) lub dwunastym ( $\Delta x = 0,125 \mu\text{m}$ ) dla próbki szlifowanej oraz ósmym

TABLICA I. Wyniki obliczeń: poziom dekompozycji

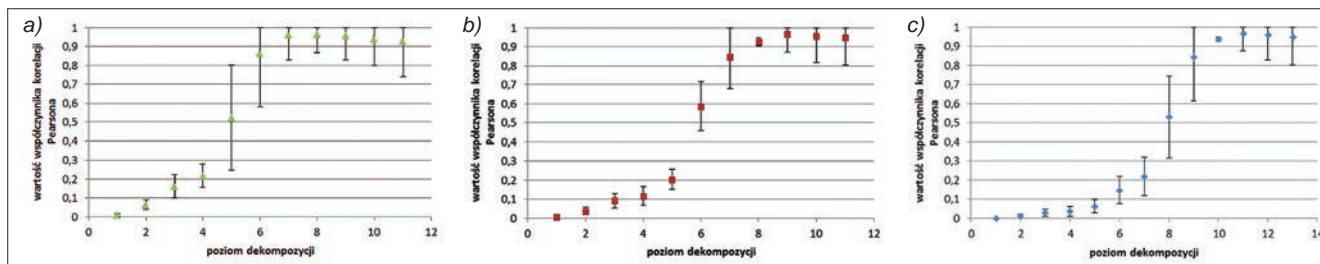
$\Delta x, \mu\text{m}$	0,125	0,5	1
Szlifowanie	12	10	9
$\Delta x, \mu\text{m}$	0,391	1,563	3,125
Druk 3D	11	9	8

( $\Delta x = 3,125 \mu\text{m}$ ), dziewiątym ( $\Delta x = 1,563 \mu\text{m}$ ) lub jedenastym ( $\Delta x = 0,391 \mu\text{m}$ ) dla próbki wykonanej metodą przyrostową. Na kolejnym poziomie dekompozycji falkowej otrzymano mniejsze wartości współczynnika zgodności zarysów. Wyniki pokazane na rys. 3 i 4 dotyczą falki bazowej db20, jednak analogiczne wartości uzyskano w przypadku pozostałych falek bazowych, wykorzystanych w analizie. W tabl. I zamieszczono wyniki obliczeń poziomu dekompozycji, na którym współczynnik korelacji zarysów osiągnął maksimum. Na tej podstawie można wnioskować, że dla powierzchni próbek o regularnym rozkładzie nierówności proces dekompozycji falkowej należy przeprowadzić na większej liczbie poziomów niż w przypadku powierzchni o bardziej losowym rozkładzie nierówności.

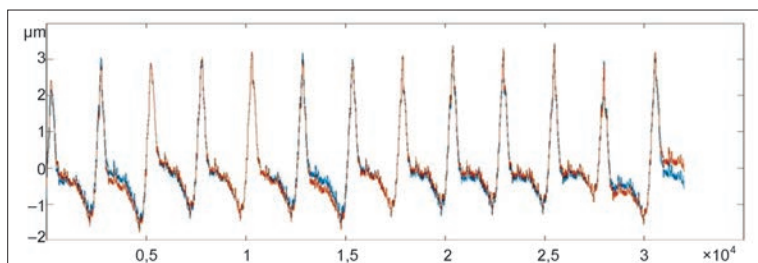
Wyniki analizy na wskazanym w tabl. I poziomie dekompozycji dla falki bazowej db20 przedstawiono na rys. 5 i 6. Otrzymane zarysy profili chropowatości uzyskano z daną gęstością próbkowania (32 000 punktów pomiarowych).



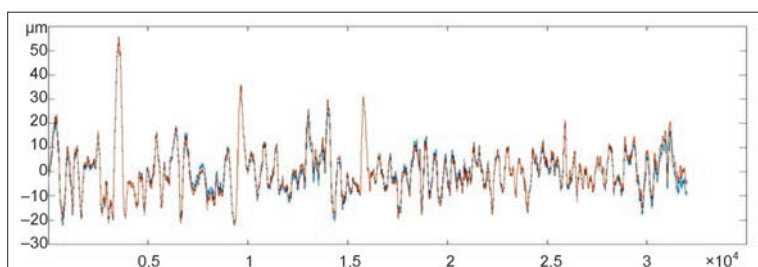
Rys. 3. Wartości współczynnika korelacji dla próbki szlifowanej (falka bazowa db20) dla różnych odstępów próbkowania: a)  $\Delta x = 1 \mu\text{m}$  (4000 punktów pomiarowych), b)  $\Delta x = 0,5 \mu\text{m}$  (8000 punktów pomiarowych), c)  $\Delta x = 0,125 \mu\text{m}$  (32 000 punktów pomiarowych)



Rys. 4. Wartości współczynnika korelacji dla próbki wykonanej w technologii druku 3D (falka bazowa db20): a)  $\Delta x = 3,125 \mu\text{m}$ , b)  $\Delta x = 1,563 \mu\text{m}$ , c)  $\Delta x = 0,391 \mu\text{m}$



Rys. 5. Profil chropowatości powierzchni szlifowanej,  $l_n = 4 \text{ mm}$  (niebieskim kolorem oznaczono profil otrzymany po zastosowaniu filtracji Gaussa, a czerwonym – profil otrzymany w wyniku analizy falkowej)



Rys. 6. Profil chropowatości powierzchni wytworzonej techniką druku 3D,  $l_n = 12,5 \text{ mm}$  (niebieskim kolorem oznaczono profil otrzymany po zastosowaniu filtracji Gaussa, a czerwonym – profil otrzymany w wyniku analizy falkowej)

**TABLICA II. Wartości parametrów chropowatości 2D dla profili powierzchni po operacji szlifowania**

	$\lambda_c$	dwt	$\lambda_c$	dwt	$\lambda_c$	dwt
$\Delta x, \mu\text{m}$	0,125		0,5		1	
$Ra, \mu\text{m}$	0,70	0,73	0,69	0,72	0,70	0,73
	0,71	0,74	0,71	0,73	0,71	0,73
	0,74	0,86	0,74	0,86	0,74	0,86
$Rq, \mu\text{m}$	0,98	1,00	0,96	0,99	0,97	1,01
	0,98	1,02	0,98	1,01	0,98	1,01
	1,04	1,16	1,03	1,16	1,03	1,17
$Rt, \mu\text{m}$	4,97	5,21	4,94	5,25	5,00	5,45
	4,80	5,14	4,80	5,18	4,78	5,16
	5,86	6,99	5,86	7,01	5,81	6,94
$Rsk$	1,45	1,33	1,42	1,30	1,44	1,27
	1,40	1,29	1,40	1,29	1,40	1,30
	1,33	0,75	1,32	0,72	1,32	0,71
$Rku$	4,59	4,35	4,49	4,28	4,57	4,33
	4,44	4,22	4,43	4,21	4,44	4,24
	4,74	4,02	4,71	4,00	4,71	3,97
$RSm, \text{mm}$	0,23	0,21	0,24	0,20	0,23	0,21
	0,17	0,19	0,19	0,25	0,22	0,25
	0,17	0,27	0,17	0,29	0,24	0,27

**TABLICA III. Wartości parametrów chropowatości 2D dla profili powierzchni elementów wytworzonych techniką druku 3D**

	$\lambda_c$	dwt	$\lambda_c$	dwt	$\lambda_c$	dwt
$\Delta x, \mu\text{m}$	0,391		1,563		3,125	
$Ra, \mu\text{m}$	7,07	6,75	7,20	7,36	7,16	7,31
	4,52	5,23	4,43	5,11	4,42	5,09
	4,11	4,85	4,11	4,34	4,08	4,79
$Rq, \mu\text{m}$	9,63	9,43	9,72	9,90	9,69	9,85
	5,74	6,65	5,61	6,57	5,60	6,53
	5,21	6,03	5,21	5,62	5,18	5,98
$Rt, \mu\text{m}$	77,66	76,00	65,73	66,01	63,88	64,70
	41,10	50,48	39,25	50,53	39,30	49,27
	41,13	41,49	41,56	40,99	40,81	41,27
$Rsk$	1,18	1,25	1,08	1,05	1,09	1,07
	0,17	0,40	0,22	0,52	0,23	0,54
	0,00	0,20	0,02	0,23	0,03	0,19
$Rku$	7,34	7,59	5,35	5,11	5,33	5,15
	3,39	3,88	3,48	4,41	3,53	4,43
	3,63	3,00	3,67	3,39	3,67	3,07
$RSm, \text{mm}$	0,24	0,27	0,22	0,22	0,23	0,24
	0,22	0,25	0,22	0,24	0,21	0,25
	0,19	0,24	0,19	0,25	0,19	0,25

**TABLICA IV. Wartości statystyki t-Studenta**

$\Delta x, \mu\text{m}$	Szlifowanie			Druk 3D		
	0,125	0,5	1	0,391	1,563	3,125
$Ra, \mu\text{m}$	-1,949	-1,831	-1,934	-1,097	-2,192	-2,793
$Rq, \mu\text{m}$	-1,927	-1,944	-2,016	-1,433	-2,201	-2,683
$Rt, \mu\text{m}$	-2,025	-2,256	-2,734	-0,793	-0,958	-1,206
$Rsk$	1,726	1,749	1,854	-3,452	-1,681	-1,554
$Rku$	2,424	2,288	2,278	-0,11	-0,342	-0,091
$RSm, \text{mm}$	-0,897	-0,919	-0,755	-6,143	-1,443	-2,273

Aby analiza wpływu gęstości próbkowania poziomego na proces dekompozycji falkowej – w aspekcie jej wykorzystania do rozdzielania profilu pierwotnego na składowe o różnych częstotliwościach – była pełniejsza, zbadano zmienność wybranych parametrów chropowatości 2D. W tym celu wyznaczono wartości parametrów zarówno dla zarysu profilu otrzymanego w efekcie filtracji Gaussa, jak i dla zarysu otrzymanego w wyniku sumowania współczynników opisujących zarysy detali na wskazanym w tabl. I poziomie dekompozycji falkowej. W celu zbadania, czy dla wytypowanych parametrów występują istotne różnice ich wartości, wykonano analizę z wykorzystaniem testu średnich t-Studenta w odniesieniu do prób zależnych. Dla przyjętego poziomu istotności  $\alpha = 0,05$  ustalono wartość krytyczną testu  $t_c = 2,92$ . W tabl. II i III zestawiono wyznaczone wartości wybranych parametrów chropowatości 2D, otrzymanych dla profili powierzchni po operacji szlifowania oraz dla profili powierzchni elementów wykonanych techniką przyrostową. W tabl. IV przedstawiono wartości statystyki t-Studenta.

Na podstawie danych zamieszczonych w tabelach można stwierdzić, że na przyjętym poziomie istotności w przypadku większości ocenianych parametrów nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy ich wartościami. Wartości statystyki t-Studenta jedynie w dwóch przypadkach znalazły się w obszarze krytycznym testu – chodzi o parametry  $Rsk$  i  $Rsm$ , wyznaczone dla profilu powierzchni próbki wykonanej techniką przyrostową, której pomiar przeprowadzono z odstępem próbkowania poziomego  $\Delta x = 0,391 \mu\text{m}$ .

## Podsumowanie

Analizie poddano profile 2D otrzymane w wyniku pomiaru dwóch rodzajów próbek. Badane profile powierzchni próbki uzyskanej w wyniku szlifowania obwodowego charakteryzowały się regularnym rozkładem nierówności powierzchni, w przeciwieństwie do nierówności opisujących profile powierzchni próbki wykonanej metodą przyrostową.

Badania wpływu gęstości próbkowania poziomego na proces dekompozycji falkowej wykazały, że zwiększenie gęstości próbkowania w analizowanym zakresie  $\Delta x$  skutkuje tym, że konieczne jest przeprowadzenie analizy falkowej na większej liczbie poziomów dekompozycji. Dwukrotne zwiększenie liczby punktów pomiarowych skutkowało koniecznością przeprowadzenia dekompozycji o jeden poziom więcej, natomiast kolejne, czterokrotne zwiększenie liczby punktów pomiarowych spowodowało, że najwyższy współczynnik korelacji odnotowano o kolejne dwa poziomy później.

Na podstawie wartości zebranych w tabl. I można wnioskować, że w aspekcie stosowania transformaty falkowej do rozdzielania składowych SGP dla powierzchni próbek charakteryzujących się regularnym rozkładem nierówności powierzchni proces dekompozycji falkowej należy prowadzić na większej liczbie poziomów niż w przypadku powierzchni próbek, dla których rozkład nierówności jest znacznie bardziej losowy.

Analiza wartości wybranych parametrów chropowatości 2D wykazała, że dla niemal każdego badanego przypadku różnice wartości nie różnią się istotnie. Jedynie w dwóch analizowanych przypadkach została przekroczona wartość krytyczna testu.

Dla wszystkich fałek bazowych wykorzystanych w analizie otrzymano analogiczne wyniki.

## LITERATURA

- Jiang X., Blunt L. "Third generation wavelet for the extraction of morphological features from micro and nano scalar surface". *Wear*. 257 (2014): s. 1235–1240.
- Abdul-Rahman H.S., Jiang X., Scott P. "Freeform surface filtering using the lifting wavelet transform". *Precision Engineering*. 37 (2013): s. 187–202.
- Chen M., Pang Q., Wang J., Cheng K. "Analysis of 3D microtopography in machined KDP crystal surfaces based on fractal and wavelet methods". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 48 (2008): s. 905–913.
- Zawada-Tomkiewicz A. "Estimation of surface roughness parameter based on machined surface image". *Metrology and Measurement System*. 17, 3 (2010): s. 493–504.
- Dutta S., Pal S.K., Sen R. "Progressive tool flank wear monitoring by applying discrete wavelet transform on turned surface images". *Measurement*. 77 (2016): s. 388–401.
- Zahouani H., Mezghani S., Vargiolu R., Dursapt M. "Identification of manufacturing signature by 2D wavelet decomposition". *Wear*. 264 (2008): s. 480–485.
- Josso B., Burton D.R., Lalor M.J. "Frequency normalized wavelet transform for surface roughness analysis and characterization". *Wear*. 252 (2012): s. 491–500.
- Makiela W., Gogolewski D. "Metoda rozdzielania składowych nierówności powierzchni za pomocą dwuwymiarowej transformaty falkowej". *Mechanik*. 11 (2016): s. 1716–1717.
- Adamczak S., Świdorski J., Dobrowolski T. "Analiza wpływu gęstości próbkowania poziomego na parametry chropowatości". *Mechanik*. 4 (2017): s. 332–334.