

Possibilities of using a wavelet transform to assess the surface conditions of abrasives belts

Możliwości zastosowania transformaty falkowej do oceny stanu powierzchni ściernych narzędzi nasypowych

MACIEJ KOWALSKI
MAREK KOŁODZIEJ
HUBERT SKOWRONEK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.10.87>

Issues regarding the application of wavelet analysis to the description of the surface condition of abrasive tools differing in grain size and construction method are presented. New tools were tested and after the specified grinding time.

KEYWORDS: roughness, abrasive belts, grinding, surface layer

Przedstawiono zagadnienia dotyczące zastosowania analizy falkowej do opisu stanu powierzchni nasypowych narzędzi ściernych, różniących się ziarnistością i metodą wykonania. Badano narzędzia nowe i po zadanym czasie szlifowania.

SŁOWA KLUCZOWE: chropowatość, taśma ścierna, szlifowanie, warstwa wierzchnia

Analiza falkowa pochodzi od klasycznej techniki dekompozycji sygnałów Fouriera. Z wartości przyjętej skali i przesunięcia wynika wartość przedziału oraz amplitudy analizowanych funkcji falkowych. Własnością falek jest podobieństwo uzyskiwane dzięki procesowi skalowania na wszystkich poziomach analiz. W przypadku gdy sygnałem jest profil chropowatości, transformata falkowa powoduje jego podział na sumę prostopadłych sygnałów składowych. Taki zabieg umożliwia analizowanie poszczególnych składowych sygnału przy różnych rozdzielczościach przestrzennych.

Falka jest funkcją matematyczną, której dobre zlokalizowanie w czasie i częstotliwości wynika z jej cech charakterystycznych: zerowe wartości średniej oraz skończonej mocy sygnału. Zerowe wartości falka przyjmuje również poza danym skończonym przedziałem.

Nazwa „falka” pochodzi od krótkotrwałej oscylacji, w której dane są informacje na temat różnych poziomów szczegółowości. Dobrze dobrana falka pozwala usunąć z analizowanego sygnału szumy i zakłócenia.

Poprawne przeprowadzenie analizy falkowej polega na dobraniu właściwej falki matki oraz funkcji skalującej, czyli falkowej funkcji analizującej. Im lepsze jest dopasowanie kształtu danej funkcji do badanego sygnału, tym mniej funkcji potrzeba do aproksymacji. Najważniejszym czynnikiem jest podobieństwo kształtu wybranej falki do analizowanego sygnału [2, 6–8].

Stosowanie analizy falkowej do oceny powierzchni po procesach obróbki skrawaniem służy do wykrywania takich anomalii występujących na profilu badanej powierzchni, których wykrycie z zastosowaniem standardowej analizy Gaussa jest niemożliwe. Analiza falkowa pozwala także uzyskać informacje na temat wszystkich ekstremów oraz ich rozkładu dla chropowatości i falisto-

ści. Może być stosowana do: wykrywania katastroficznego stopienia ostrza, skokowej zmiany naddatku, diagnostyki drgań, analizy chropowatości, analizy sił, rozpoznawania postaci wióra, oceny zużycia ostrza.

Metodyka badań

W badaniach wykorzystano stal wysokochromową X17CrNi16-2, należącą do stali nierdzewnych i kwasoodpornych. Ten materiał znajduje zastosowanie w przemyśle lotniczym, petrochemicznym, naftowym i spożywczym, do produkcji mydła oraz kwasu. Wykonuje się z niego takie elementy, jak: tuleje, walce, bolce, koła zębate.

Do badań przygotowano wałek o średnicy 50 mm. Badania prowadzono na tokarce uniwersalnej po zamontowaniu w imaku specjalnej przystawki, służącej do prowadzenia taśm ściernych. Szlifowanie poszczególnych segmentów wałka (z prędkością skrawania $v_c = 25$ m/s) wykonano swobodną częścią taśm ściernych o różnej wielkości ziaren – począwszy od taśm z nasypem elektrokorundowym o oznaczeniu P40, przez taśmy P60 i P80, po taśmy P100.

W badaniach stosowano także taśmy ścierne 3M Tri-zact o granulacji A30 i A65. Od zwykłych taśm różnią się one sposobem wykonania. Piramidowa budowa ziaren ściernych, które są rozmieszczone od siebie w równej odległości, sprawia, że w trakcie obróbki odślaniane są nowe, ostre drobinki ścierne. Dzięki temu materiał jest obrabiany równomiernie, co gwarantuje jednolite wykończenie powierzchni.

Przed obróbką i po obróbce badano stan powierzchni taśm ściernych. Pomiary chropowatości przeprowadzono na profilografometrze Form Talysurf 120L firmy Taylor Hobson. Ponieważ spodziewano się wysokich wartości analizowanych parametrów chropowatości, przyjęto odcinek pomiarowy wynoszący 40 mm oraz odcinek elementarny o długości 8 mm, co odpowiada zaleceniom zawartym w normach PN-EN ISO 3274 oraz 4288. Pomiar wykonano igłą pomiarową stożkową o kącie rozwarcia 90° i promieniu zaokrąglenia wierzchołka $5 \mu\text{m}$.

Wyniki badań

Przeprowadzone pomiary dostarczyły informacji o parametrach chropowatości powierzchni poszczególnych taśm nowych i po minucie szlifowania nimi stali nierdzewnej. Wartości zmierzonych parametrów podano w tablicy.

* Dr inż. Maciej Kowalski, maciej.kowalski@pwr.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-3413-8334> – Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, Polska
Dr inż. Marek Kołodziej, marek.kolodziej@pwr.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0001-6916-8520> – Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, Polska
Dr inż. Hubert Skowronek, hubert.skowronek@pwr.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-3398-1661> – Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, Polska

TABLE. Roughness parameters measured on the surfaces of tested abrasive belts

TABLICA. Parametry chropowości zmierzone na powierzchniach badanych taśm ściernych

Oznaczenie taśmy	Parametry chropowości			
	przed obróbką		po obróbce	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
P40	74,4	344,7	55,3	273,9
P60	59,6	270,9	43,8	210,6
P80	37,7	193,7	24,7	157,7
P100	32,5	153,2	21,3	138,5
A30	43,8	187,5	30,7	158,2
A65	29,2	142,9	23,3	132,2

Do analizy falkowej profili odwzorowujących chropowość badanych nasypowych narzędzi ściernych wykorzystano program komputerowy MATLAB, charakteryzujący się dużą liczbą funkcji bibliotecznych oraz możliwością pisania własnych funkcji i programów za pomocą wewnętrznego języka programowania [5].

Analizę falkową wykonano z zastosowaniem narzędzia Wavelet Toolbox, które jest specjalizowanym interfejsem graficznym (rys. 1).



Fig. 1. Wavelet Toolbox window
Rys. 1. Okno Wavelet Toolbox

Po wczytaniu wybranego sygnału należy określić rodzaj falki oraz skalę, dla której zostanie przeprowadzona analiza. Trzeba również określić liczbę kroków, po której ma się zmieniać wartość skali. Parametry dobierane w celu przeprowadzenia analizy CTF (ciągłej transformaty falkowej) przedstawiono na rys. 2.

Warto pamiętać, że podstawą prawidłowego zastosowania transformaty falkowej jest wybór odpowiednich falek do analizy sygnału. Ten wybór zależy od właściwości poszczególnych falek lub ich podobieństwa do badanego sygnału.

Rodzaj falki dobrano po przeprowadzeniu eksperymentalnych analiz (z zastosowaniem różnych typów falek) fragmentów profili chropowości zmierzonych na taśmach nowych, bez śladów zużycia. Wyniki otrzymane dla różnych falek porównywano ze sobą w sposób wizualny w poszukiwaniu jak najwyraźniejszych symptomów niestabilności mierzonego sygnału. Przy wyborze falki posługiwano się również zaleceniami zawartymi w literaturze – zgodnie z nimi do oceny sygnałów o przebiegu nieliniowym dobrze nadają się m.in. falki meksykański

kapeluszy i Morleta [7]. Pierwsza pozwala uzyskać informacje o wartościach i rozkładzie ekstremów sygnału, jednak nie mówi nic na temat długości składowych falek. Dzięki zastosowaniu falki Morleta można uzyskać informacje o długościach falek, natomiast informacje o wartościach amplitud nie są precyzyjne. Dokładna analiza wymaga więc zastosowania co najmniej dwóch ciągłych transformat falkowych, w których zostaną użyte różne falki [1–4].

W niniejszym artykule przedstawiono jedynie wybrane wyniki analiz CTF profili nierówności występujących na nasypowych narzędziach ściernych. Na rys. 3 zaprezentowano wyniki analizy CTF dla taśmy P40, a na rys. 4 – dla taśmy Trizact A30.

Po przeprowadzeniu analizy profilu chropowości taśmy o oznaczeniu P40 ciągłą transformatą falkową z zastosowaniem falki meksykański kapeluszy można zauważyć rozkład i wartości ekstremów profilu. Są to pola

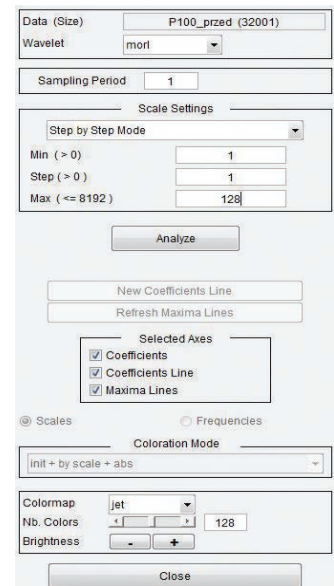


Fig. 2. Ability to set CTF analysis parameters
Rys. 2. Możliwość ustawienia parametrów analizy CTF

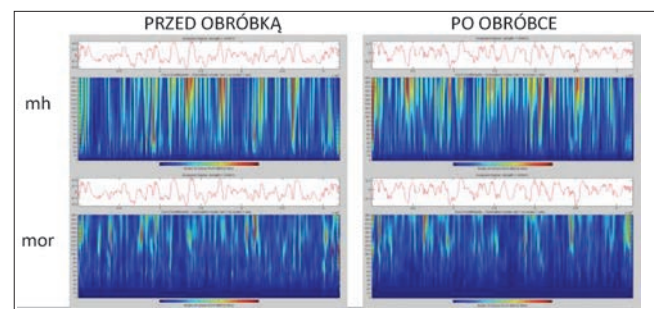


Fig. 3. Continuous wavelet transform for P40 tape (mh – Mexican hat wavelet, mor – Morlet wavelet)

Rys. 3. Ciągła transformata falkowa dla taśmy P40 (mh – falka meksykański kapeluszy, mor – falka Morleta)

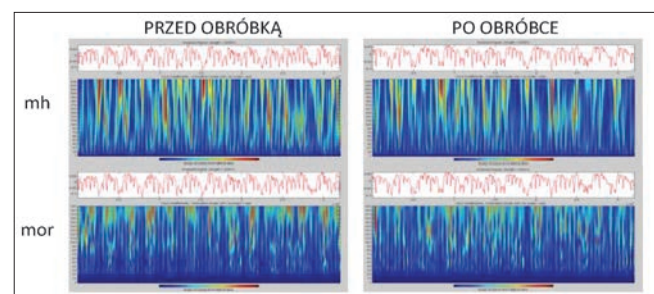


Fig. 4. Continuous wavelet transform for Trizact A30 tape (mh – Mexican hat wavelet, mor – Morlet wavelet)

Rys. 4. Ciągła transformata falkowa dla taśmy Trizact A30 (mh – falka meksykański kapeluszy, mor – falka Morleta)

w kolorze innym niż niebieski. Najintensywniejsza czerwień oznacza miejsca, w których występują ekstrema profilu. Osiągają one wartości w okolicach 13 500. punktu na profilu, gdzie występuje największe jego zagłębienie na badanym odcinku. Podobna sytuacja występuje w okolicach punktu 17 800. Kolejne ekstremum widoczne jest w pobliżu punktu 26 000. Analiza profilu CTF otrzymanego po zastosowaniu falki Morleta wskazuje na dwa pasma: pierwsze – krótkookresowe w skali 45÷70, drugie – o niższej częstotliwości zaczyna się od wartości skali 100.

W analizie profilu chropowatości zmierzonego na taśmie P40, która pracowała przez minutę, zastosowanie falki meksykański kapelusznik uwidoczniło więcej ekstremów funkcji niż przed obróbką. Wiele z tych ekstremów znajduje się na podobnych poziomach, przy czym dwa największe można zauważyć w okolicy 8000. oraz 20 500. punktu próbki. W przypadku zastosowania falki Morleta nie zauważono żadnego wyraźnego pasma.

Analiza profilu nieużywanej taśmy Trizact A30, z wykorzystaniem ciągłej transformaty falkowej falką meksykański kapelusznik, wskazuje, że największe wartości ekstremów znajdują się w miejscach największych zagłębień profilu, tj. w okolicy 2500., 5000. i 15 300. punktu próbkowania. Po badaniu sygnału falką Morleta zauważono dwa pasma: pierwsze w przedziale skali 25÷45 oraz drugie w przedziale skali 70÷100. Widoczna jest także powtarzalna wielkość skali co ok. 2500 punktów próbkowania analizowanego profilu, co może wskazywać na regularność ułożenia struktur tworzących nasyp ścierny na badanej taśmie.

Po przeprowadzeniu próby szlifowania taśmą Trizact A30 i wykonaniu analizy CTF falką meksykański kapelusznik – podobnie jak w przypadku taśmy nieużywanej – największe wartości ekstremów wykryto w punktach największych zagłębień, a przede wszystkim w okolicach 8500. i 20 200. punktu badanej próbki. Ciągła transformata falkowa z użyciem falki Morleta ukazuje jedno pasmo znajdujące się w tym samym miejscu co w przypadku profilu zmierzonego na badanej taśmie przed obróbką. Jest to więc najprawdopodobniej składowa związana z okresowo powtarzającymi się wgłębieniami, występującymi na uporządkowanych strukturach nasypu typu Trizact.

Zastosowanie falki meksykański kapelusznik i ciągłej transformaty falkowej ujawniło na taśmie o nasypie P40 postępujące wraz z obróbką, powolne zużycie ziaren znajdujących się w strefie styku z materiałem obrabianym, czyli ziaren najbardziej wystających ze spoiwa. Ekstrema występujące na profilu są bardziej widoczne, a ich wartości zaczynają się do siebie zbliżać. Prawdopodobnie jest to spowodowane postępującym zużyciem ściernym najwyższej ułożonych ziaren, które w taśmach o standardowym nasypie ulegają ścieraniu, odstawiając kolejne, mniej wysunięte ziarna ściernie. Wysokości wzniesień profilu osiągają dzięki temu podobne wartości, co skutkuje mniejszymi wartościami ekstremów funkcji. Najbardziej widoczne pozostają najniższe zagłębienia profilu, dla których CTF osiąga zdecydowanie największe wartości.

Analizując wyniki ciągłych transformat falkowych z zastosowaniem falki Morleta przed obróbką i po obróbce powierzchni taśmą z nasypem Trizact, można stwierdzić, że w przypadku taśmy nowej widoczne są – co określoną, stałą liczbę punktów pomiarowych – powtarzalne wielkości skali. Z kolei na taśmach, dla których rozpoczął się proces zużycia ściernego, znalezienie podobnej regularności jest znacznie trudniejsze do wykrycia. Poszczególne granice pasm ulegają zatarciu, a długości składowe falek przyjmują podobne wartości na całym analizowanym odcinku pomiarowym.

Falka meksykański kapelusznik, użyta do ciągłej analizy falkowej narzędzi o zmieniającej się wielkości ziarna zastosowanego na nasyp ścierny, silnie podkreśla różnice w rozkładach ekstremów funkcji. W przypadku taśm o oznaczeniu P40 widać niewielką liczbę ekstremów, natomiast wraz ze zmniejszaniem się wielkości ziarna zastosowanego na nasyp ścierny liczba ekstremów stale rośnie, co było widoczne zwłaszcza w paśmie falek krótkookresowych – jak dla taśmy P100. Jest to spowodowane przede wszystkim zmniejszającym się rozmiarem ziarna. W takim przypadku ziarna są ułożone gęściej, co powoduje częstsze występowanie ekstremów związanych z zagęszczeniem wzniesień i wgłębien na ocenianym profilu.

W przypadku ciągłej transformaty falkowej z użyciem falki Morleta można zauważyć, że wraz ze zmniejszaniem się wielkości ziarna zastosowanego na nasyp ścierny zwiększają się także liczba i wielkość poszczególnych składowych falek profilu. Dostrzeżono ponadto krótkookresowe pasma falek występujące dla taśm z drobniejszymi ziarnami (P80 i P100) oraz dla taśm o pewnej regularności ułożenia nasypu (Trizact A30 i A65).

Podsumowanie

Analizując wyniki otrzymane po zastosowaniu różnych rodzajów falek, należy stwierdzić, że do uzyskania możliwie kompletnej informacji o badanej powierzchni konieczne jest zastosowanie co najmniej dwóch różnych rodzajów falek, z których jedna dostarcza danych o wartości ekstremów i ich rozkładzie na badanych profilach, a druga – danych o długości składowych czy ewentualnych zakłóceniach i intensywności ich występowania na styku ziarna i obrabianego przedmiotu.

Ponieważ ciągła transformata falkowa wymaga dużych nakładów obliczeniowych, uzasadnione wydaje się prowadzenie badań nad jakością opisu stanu powierzchni narzędzia ściernego – również z zastosowaniem dyskretnej odmiany analizy falkowej. W tej analizie współczynniki skali i przesunięcia są oparte na potęgach liczby dwa. Dyskretna analiza falkowa bazuje na teorii analizy wielorozdzielczej, w której stosowana jest para filtrów dolno- i górnoprzepustowych (tzw. dwukanałowy koder podpasmy) [5]. Dzięki takiemu podejściu dowolny sygnał można poddać dekompozycji na składową niskoczęstotliwościową, przedstawiającą ogólny przebieg sygnału, i składową wysokoczęstotliwościową, reprezentującą szczegółowe cechy sygnału. W tym przypadku proces dekompozycji jest iteracyjny, więc jeden sygnał może zostać rozbit na wiele mniejszych elementów i być źródłem dodatkowych informacji o stanie narzędzia ściernego.

LITERATURA

- [1] Augustyniak P. „Transformacje falkowe w zastosowaniach elektrodiagnostycznych”. Kraków: Uczelniane Wydawnictwo AGH, 2003.
- [2] Białasiewicz J.T. „Falki i aproksymacje”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2004.
- [3] Grzesik W., Brol S. “Wavelet and fractal approach to surface roughness characterization after finish turning of different workpiece materials”. *Journal of Materials Processing Technology*. 209 (2009): 2522–2531.
- [4] Hennel J.W. „Jak zrozumieć falki. Podstawy falkowej analizy sygnałów”. Kraków: ZamKor, 2010.
- [5] Misiti M., Misiti Y., Oppenheim G., Poggi J-M. „Wavelet Toolbox for use with Matlab”. The MathWorks, Inc. 1997.
- [6] Timofiejczuk A. „Metody analizy sygnałów niestacjonarnych”. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2004.
- [7] Wojtaszczyk P. „Teoria falek”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2000.
- [8] Zawada-Tomkiewicz A. „Analiza obrazu powierzchni obrabianej do celów estymacji parametrów tej powierzchni”. *Acta Mechanica et Automatica*. 1, 2 (2007).