

Paweł LEŻAŃSKI¹

OCENA PRZYDATNOŚCI WYBRANYCH WIELKOŚCI PROCESOWYCH DO NADZOROWANIA STANU PROCESU SZLIFOWANIA WGLĘBNEGO

Zaprezentowane badania koncentrują się na poszukiwaniu najefektywniejszych metod przetwarzania sygnałów pomiarowych wielkości procesowych w celu ustalenia optymalnego zestawu ich cech stanowiących symptomy stanu procesu szlifowania wglębnego. Wykorzystano pomiary emisji akustycznej, drgań i składowych siły szlifowania uzyskane w wyniku przeprowadzonych badań doświadczalnych. Stan i wyniki procesu dla każdej próby szlifowania zostały także określone poprzez pomiary parametrów topografii CPS oraz chropowatości i falistości przedmiotu po każdej próbie szlifowania. Otrzymane wyniki mogą być zastosowane do budowy modeli stanu ściernicy i procesu szlifowania oraz pozwalają na ustalenie ogólnych zaleceń dla realizacji zautomatyzowanych systemów nadzorowania procesu szlifowania wglębnego. Zaprezentowano sposób wykorzystania wielu układów pomiarowych wielkości procesowych do nadzorowania stanu ściernicy i procesu szlifowania wglębnego oraz oceniono doświadczalnie efektywność takiego podejścia.

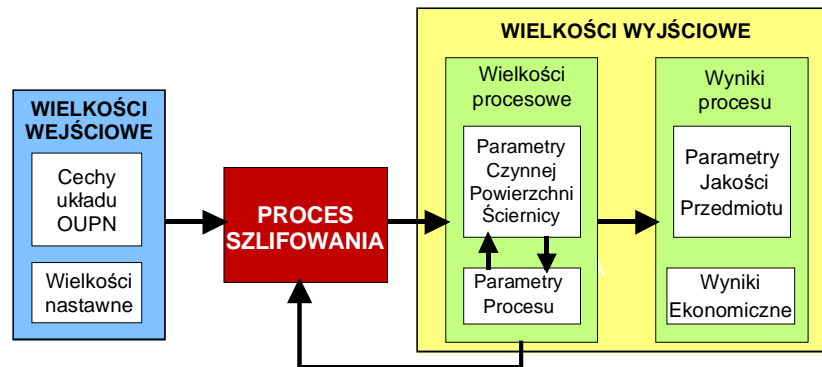
1. WPROWADZENIE

Podstawą każdego automatycznego systemu nadzorowania jest układ monitorowania procesu czyli co najmniej jeden lub więcej przetworników pomiarowych generujących sygnały pozwalające na wyznaczenie wartości wybranych cech tych sygnałów, charakteryzujących stan procesu. Jeśli są one skorelowane z miarą poszukiwanego stanu procesu to stanowią symptomy tego stanu. Schemat zależności pomiędzy wielkościami charakteryzującymi proces szlifowania przedstawia rys. 1.

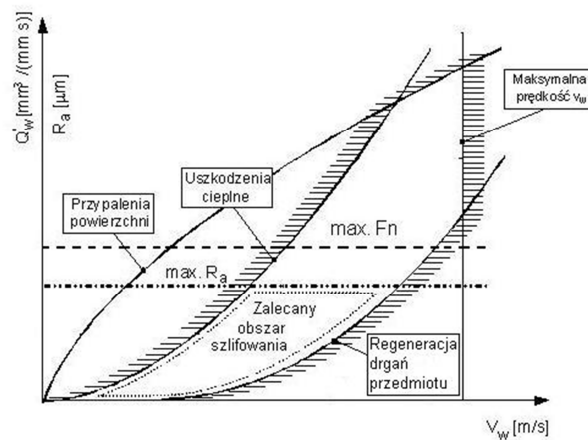
Dla określonego zestawu stałych wielkości wejściowych procesu szlifowania wglębnego, zakładając stałą prędkość ściernicy, istnieje tzw. zalecany obszar szlifowania (rys. 2) [12]. Obszar ten ograniczony jest możliwością powstania przypaleń i innych uszkodzeń cieplnych powierzchni obrabianej, utratą stabilności procesu spowodowaną efektem regeneracji drgań samowzbudnych oraz, co wynika wyłącznie z warunków technicznych, maksymalną prędkością przedmiotu. Ponadto, zalecany obszar szlifowania zawężony jest przez nałożenie ograniczeń wynikających z dopuszczalnej siły normalnej lub chropowatości powierzchni.

¹ Politechnika Łódzka, Instytut Obrabiarek i TBM, 90-924 Łódź, ul. Stefanowskiego 1/15, plezan@p.lodz.pl

Proces szlifowania ma charakter losowy i niestacjonarny. Skutkuje to przemieszczaniem się granic zalecanego obszaru szlifowania w ramach pojedynczego okresu trwałości ściernicy, a nawet pojedynczego cyklu pracy. Z tego względu, najefektywniejszą metodą utrzymania procesu szlifowania w stanie akceptowalnym z punktu widzenia jego przebiegu oraz jakości technologicznej przedmiotu po szlifowaniu jest ciągłe monitorowanie wielkości procesowych skorelowanych ze stanem zużycia ściernicy oraz zjawiskami fizycznymi ograniczającymi ten stan.



Rys. 1. Zależności pomiędzy wielkościami charakteryzującymi proces szlifowania
Fig. 1. Relationships between grinding process inputs and outputs



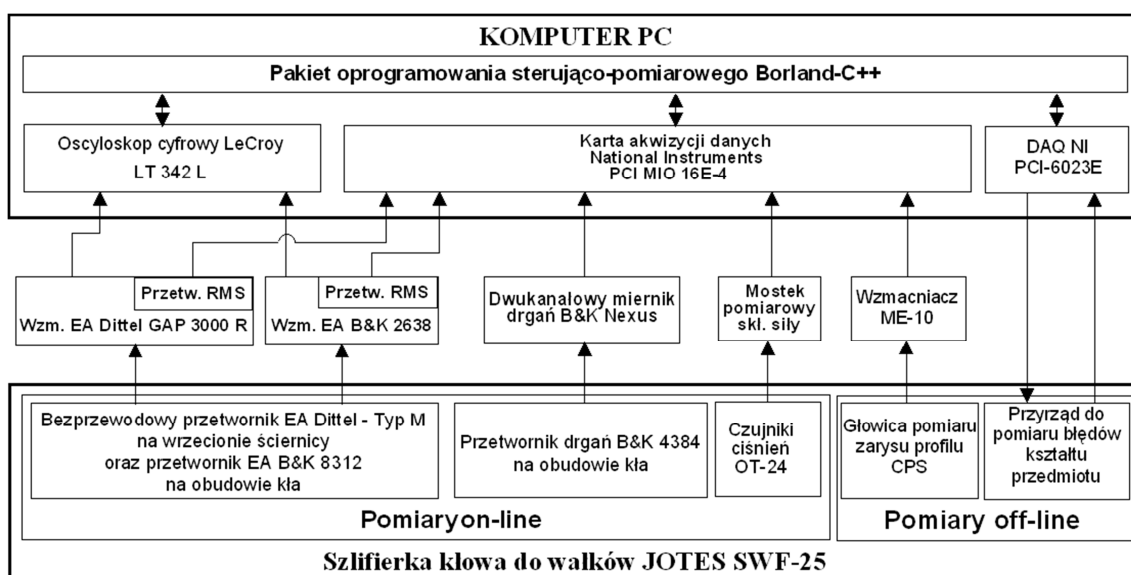
Rys. 2. Zalecany obszar szlifowania
Fig. 2. Recommended area of grinding

2. UKŁAD MONITOROWANIA PROCESU

Badania doświadczalne przeprowadzono na zmodernizowanej szlifierce do wałków JOTES SWF25 [6,7,8]. Na system monitorowania procesu w trybie czasu rzeczywistego (on-line) składały się układy pomiaru wszystkich składowych siły szlifowania, drgań i emisji akustycznej (EA) – rys. 3. Ponadto, szlifierka została wyposażona w działające w systemie off-line przyrządy specjalne do pomiaru zarysu profilu czynnej powierzchni

ściernicy (CPS) [8] oraz do jednoczesnego pomiaru średnicy i błędu kształtu przedmiotu szlifowanego [6]. Taki wybór wielkości mierzonych został podyktowany oceną możliwości zrealizowania niezawodnych układów pomiarowych i potrzebą uzyskania zestawu sygnałów pomiarowych wszechstronnie charakteryzujących proces. Przeprowadzone badania doświadczalne miały na celu ustalenie przydatności wybranych wielkości procesowych do oceny stanu procesu szlifowania.

Układy pomiarowe EA umożliwiły pomiar w zakresie do 1 MHz w postaci sygnału surowego lub jego wartości skutecznej. Sygnał z czujnika na obudowie kła konika był wykorzystywany do wykrywania kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym [6], natomiast do monitorowania procesu szlifowania był wykorzystywany czujnik bezprzewodowy. Drgania w zakresie do 10 kHz mierzone były czujnikiem umiejscowionym na obudowie kła konika. Do pomiaru składowych siły szlifowania wykorzystywano pomiar różnicy ciśnień w odpowiednich komorach łożysk hydrostatycznych wrzeciona ściernicy.



Rys. 3. Układ monitorowania procesu szlifowania
Fig. 3. Grinding process monitoring system

W artykule wykorzystano wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych z udziałem P. Lajmerta i D. Wrąbła, które były również podstawą wcześniejszych publikacji [7,9,10]. W badaniach tych szlifowano węgłnie próbki ze stali 38HMJ hartowanej do twardości 53 HRC ściernicą 38A80KVBE z prędkością 40 m/s. Próby przeprowadzono dla właściwej wydajności objętościowej równej 1, 2 i 3 mm³/mms oraz dla stosunku prędkości 60, 100 i 400 w seriach, dla których na początku ściernica była w pełni ostra tuż po obciążeniu, a na końcu w pełni zużyta. Szlifowano w cyklach roboczych składających się z dosuwu roboczego bez wyiskrzania i z szybkiego wycofania ściernicy, każdorazowo zbierając naddatek wielkości 150 μm.

W czasie prób rejestrowano cyfrowo sygnały pomiarowe składowych siły szlifowania, drgań i wartości skutecznej emisji akustycznej w zakresie częstotliwości do 5 kHz, oraz

sygnału surowego emisji akustycznej w zakresie do 500 kHz. Siły szlifowania rejestrowano w sposób ciągły z częstotliwością próbkowania 500 Hz. Drgania oraz wartość skuteczną emisji akustycznej rejestrowano w pakietach po 2048 próbek, co 1 sekundę, z częstotliwością próbkowania 10 kHz. Sygnał surowy emisji akustycznej w postaci pakietu składającego się z 16kB próbek rejestrowano raz w czasie każdego cyklu szlifowania z częstotliwością próbkowania 1 MHz.

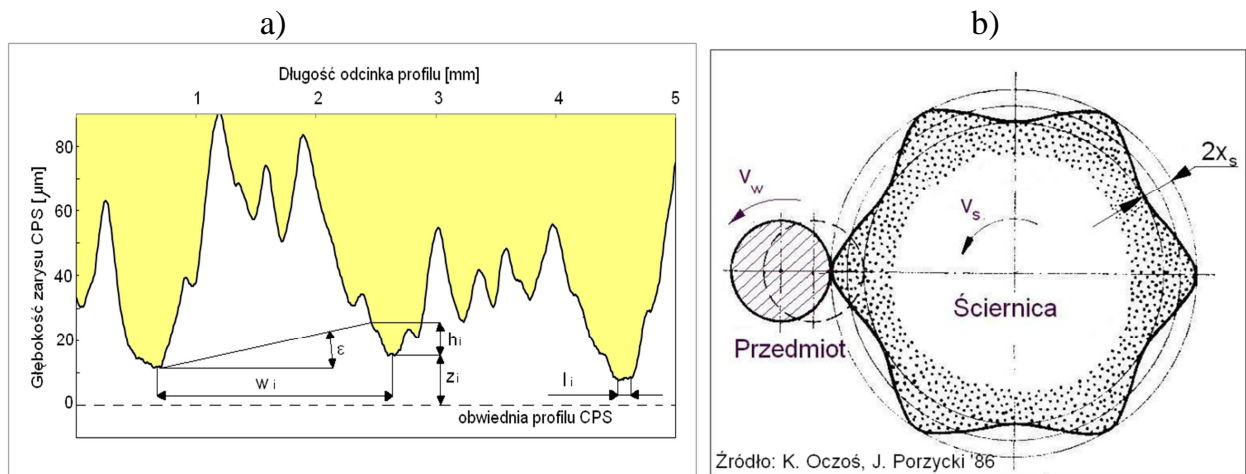
Pomiary parametrów zarysu i falistości CPS oraz błędów kształtu i falistości przedmiotu wykonywano po każdym dwóch cyklach roboczych, co dla szlifowania przedmiotów o średnicy około 100 mm jest równoznaczne z usunięciem 100 mm³ nadkładu na 1 mm szerokości ściernicy.

Rejestrację wszystkich danych pomiarowych wykonano za pomocą oprogramowania wykonanego przez P. Lajmerta w języku BORLAND C++ [6, 7]. Przetwarzanie otrzymanych sygnałów pomiarowych wykonano przy wykorzystaniu własnego oprogramowania do przetwarzania i analizy uzyskanych danych w środowisku LabVIEW [13].

3. NADZOROWANIE STANU CPS

Z punktu widzenia automatyzacji szlifowania, zagadnienie wiarygodnego opisu zmian zdolności skrawnej ściernicy zachodzących w następstwie zmian zachodzących w mikro- i karo-geometrii CPS w wyniku użycia jej w procesie szlifowania ma zasadnicze znaczenie.

Na rys. 4 zilustrowano mikro- i makrozużycie CPS oraz opisano parametry geometryczne opisujące oba te rodzaje zużycia.



Rys. 4. a) Parametry opisu stanu mikrogeometrii CPS: w_i – odległości pomiędzy ostrzami skutecznymi, h_i – grubości wiórów przypadające na skuteczne ostrza, z_i – głębokości zalegania skutecznych ostrzy, l_i – długości styku skutecznych ostrzy z przedmiotem obrabianym wynikające ze ściernego zużycia ostrza, ε – kąt promieniowego wnikania materiału obrabianego w przestrzeń roboczą ściernicy, b) Makrozużycie ściernicy – falistość na obwodzie ściernicy: x_s – amplituda falistości

Fig. 4. a) Parameters of the grinding wheel surface micro-geometry: w_i – distance between active grains, h_i – chip thickness per an active grain, z_i – active grain occurrence depth, l_i – active grain length of contact with the workpiece resulting from the grain wear, ε – angle of grinding material penetration into the wheel working space, b) Macro-wear of the grinding wheel – waviness of the wheel peripheral surface: x_s – waviness amplitude

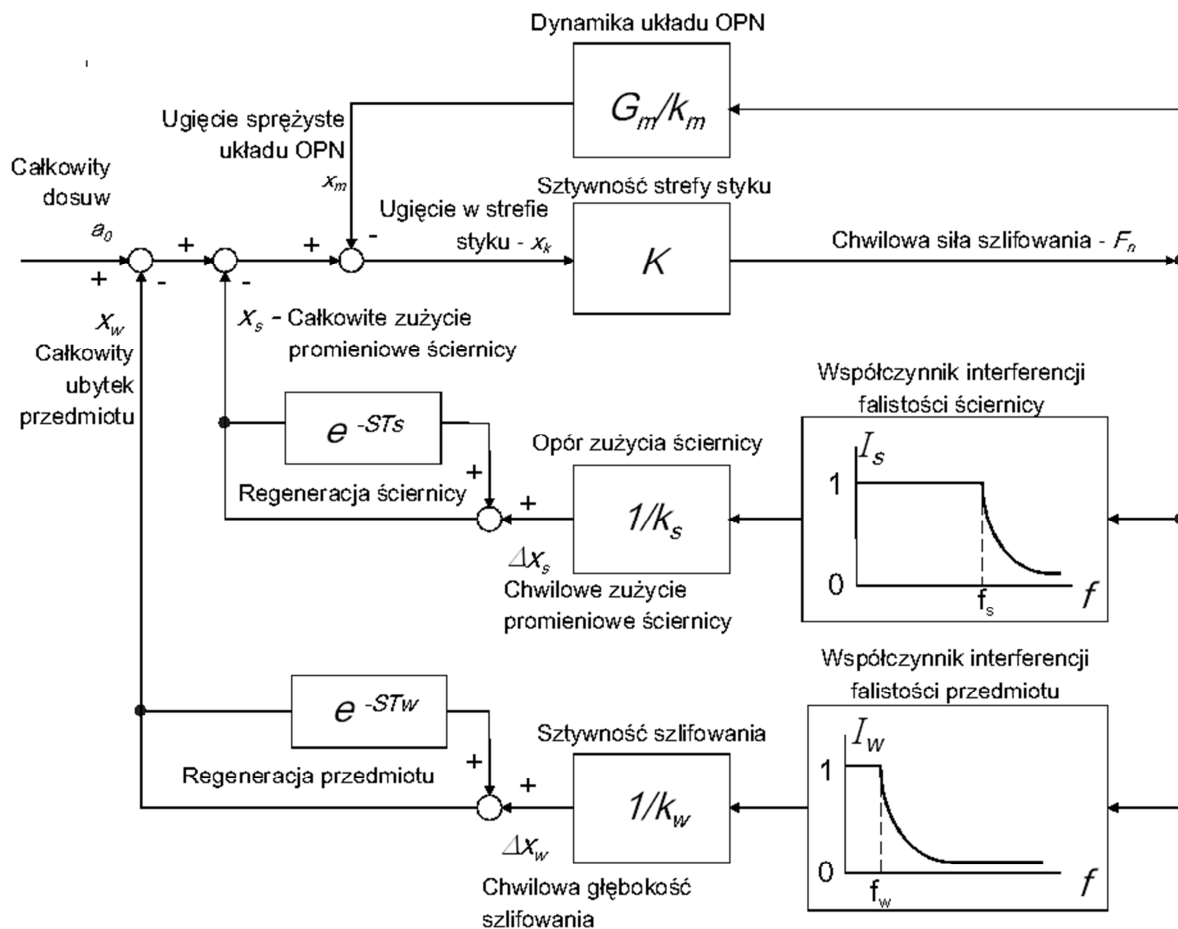
Mikrogeometria CPS odnosi się do stanu poszczególnych ziaren ściernych i ich otoczenia (porów powietrza i mostków spoiwa). Zmiany mikrogeometrii związane są z tępieniem się ziaren, ich wykruszaniem i pękaniem, z wrywaniem ziaren i erozją spoiwa, a także z zalepianiem ściernicy. Wszystkie te zjawiska wywierają znaczny wpływ na jakość warstwy wierzchniej przedmiotu szlifowanego, wydajność, energochłonność i koszty obróbki. Zmiany w mikrogeometrii CPS mogą być określone jako mikrozużycie ściernicy. Makrogeometria CPS odnosi się do kształtu bryły ściernicy i ma bezpośredni wpływ na odchyłki kształtowo-wymiarowe przedmiotu szlifowanego. Suma zmian zachodzących w mikrogeometrii ściernicy składa się na jej makrozużycie.

3.1. MAKROZUŻYCIE CPS

Szczególną formą makrozużycia promieniowego ściernicy, mającą istotne znaczenie w szlifowaniu wglębnym, jest rozwój falistości na obwodzie ściernicy. Falistość ściernicy, obok falistości przedmiotu, jest podstawową przyczyną regeneracji drgań somowzbudnych występujących w szlifowaniu walcowym, mających bezpośredni wpływ na jakość powierzchni szlifowanego przedmiotu [4].

Ta forma zużywania się ściernicy ma zatem ścisły związek z dynamiką procesu szlifowania i podstawą rozważań w tym zakresie musi być analiza stabilności procesu. W oparciu o liczne prace poświęcone temu zagadnieniu [1,2,4,14,15], do analizy tej przyjęto schemat struktury dynamicznej procesu szlifowania zaproponowany przez R. Snoeys'a i D. Brown'a [14], który po modyfikacji przedstawia rys. 5 [10]. Schemat ten uwzględnia sztywność szlifowania, opór zużycia ściernicy, sztywność strefy styku ściernicy z przedmiotem oraz odkształcenie sprężyste układu OPN. Ponadto uwzględniono efekt regeneracji drgań zarówno dla przedmiotu jak i dla ściernicy. Jednakże efekt ten jest modulowany zjawiskiem interferencji geometrycznej fal zależnym od wartości częstotliwości progowych dla przedmiotu f_w i ściernicy f_s , powyżej których następuje ścinanie wierzchołków fal powstałych odpowiednio na przedmiocie i ściernicy. Stopień tego ścinania wyraża współczynnik interferencji geometrycznej fal: I_w – dla przedmiotu i I_s – dla ściernicy. Jest on ilorazem wysokości fali pozostającej odpowiednio na powierzchni przedmiotu lub CPS do amplitudy generujących ją drgań samowzbudnych. Przebieg zmian tych współczynników poglądowo pokazano na rys. 5.

Dla wielkości nastawnych stosowanych w konwencjonalnym szlifowaniu, częstotliwość progowa dla przedmiotu f_w wynosi poniżej 500 Hz. Natomiast częstotliwość progowa dla ściernicy f_s , ze względu na zalecany dla szlifowania stosunek prędkości ściernicy do przedmiotu q , będzie do 100, a nawet więcej razy wyższa. Tłumaczy to dlaczego prawie wszystkie procesy obwodowego szlifowania walcowego przebiegają w warunkach niestabilności z punktu widzenia efektu regeneracji falistości na ściernicy. Występujące w tych procesach częstotliwości drgań samowzbudnych, które są zbliżone do częstotliwości drgań własnych układu OUPN, mają zwykle wartości wyższe od częstotliwości progowej przedmiotu ale znacznie niższe od częstotliwości progowej ściernicy.



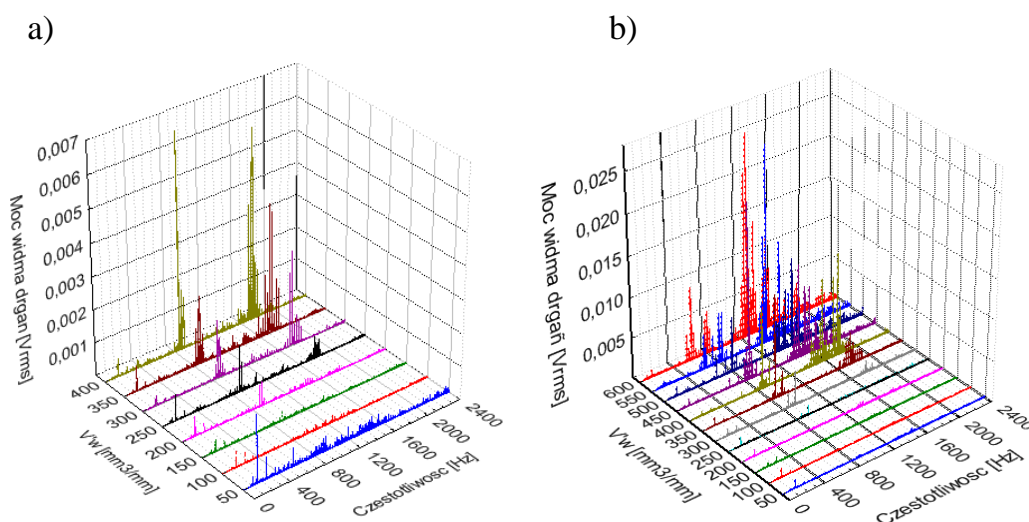
Rys. 5. Schemat blokowy struktury dynamicznej procesu szlifowania w głębinowego
 Fig. 5. Block diagram of the plunge grinding process dynamic structure

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że falistość ściernicy podczas szlifowania w głębinowego może rozwijać się do bardzo dużych wartości i jako ważna miara stanu ściernicy powinna być nadzorowana.

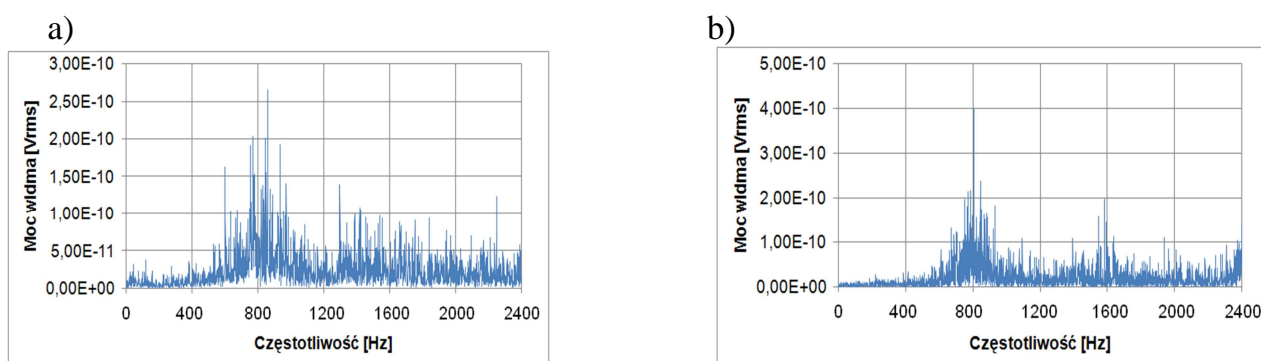
Ponieważ rozwój falistości ściernicy jest ściśle związany z rozwojem drgań samowzбудnych to nadzorowanie tego zjawiska może odbywać się poprzez analizę spektralną sygnału drgań generowanych podczas szlifowania. Najbardziej rozpowszechnioną metodą analizy cyfrowych sygnałów dynamicznych jest dyskretne przekształcenie Fouriera (DFT). Przekształcenie to wymaga jednak aby analizowany sygnał spełniał warunki liniowości i stacjonarności. W przypadku sygnału reprezentującego drgania mechaniczne (wibroakustyczne) generowane podczas szlifowania walcowego można przyjąć, że oba te warunki są spełnione [1,2,4].

Wykresy na rys. 6 pokazują typowy rozwój drgań w okresie trwałości ściernicy podczas prób szlifowania w głębinowego z różnymi parametrami.

Wyraźny wzrost amplitudy drgań następuje w dwóch zakresach częstotliwości: 700 – 900 Hz i 1500 – 2000 Hz. W celu sprawdzenia czy zakresy te obejmują częstotliwości własne układu OUPN, wykonano pomiar charakterystyk amplitudowych-częstotliwościowo tego układu. Wyniki tych pomiarów pokazano na rys. 7.



Rys. 6. Rozwój drgań w okresie trwałości ściernicy: a) $Q'_w=1 \text{ mm}^3/\text{mms}$, $q=100$, b) $Q'_w=2 \text{ mm}^3/\text{mms}$, $q=60$
 Fig. 6. Change of vibration power spectrum in wheel life period: a) $Q'_w=1 \text{ mm}^3/\text{mms}$, $q=100$,
 b) $Q'_w=2 \text{ mm}^3/\text{mms}$, $q=60$



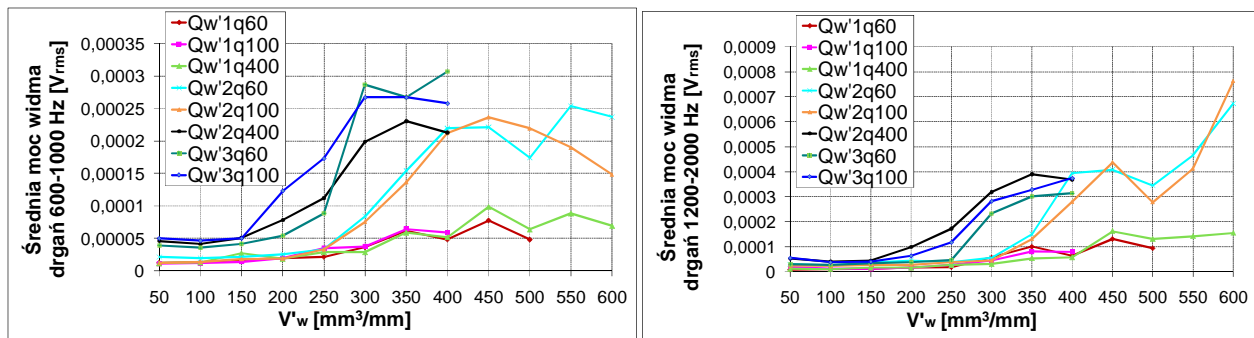
Rys. 7. Widmo amplitudo – częstotliwościowe po wymuszeniu impulsowym: a) przedmiotu, b) wrzeciennika ściernicy
 Fig. 7. Power spectrum after impulse excitation of: a) the workpiece, b) the grinding wheel headstock

Charakterystyki amplitudowo – częstotliwościowe przedstawione na rys. 6 pozwalają stwierdzić, że częstotliwość własna przedmiotu szlifowanego wynosi około 800 Hz, a dla zespołu wrzeciennika ściernicy można wyróżnić dwie częstotliwości własne: 800 i 1600 Hz. Można je zinterpretować jako kolejne częstotliwości harmoniczne tego zespołu. W obu przypadkach te częstotliwości pokrywają się z zakresami częstotliwości, w których rozwijają się częstotliwości drgań samowzбудnych podczas przeprowadzonych badań.

Kierując się wnioskami wpływającymi z analizy częstotliwości własnych układu OUPN, wyznaczono przebiegi zmian średniej mocy widma drgań w zakresie 600 – 1000 Hz i 1200 – 2000 Hz dla wszystkich przeprowadzonych prób szlifowania - rys. 8.

Zmiany średniej wartości widma mocy drgań w obu zakresach częstotliwości przebiegają podobnie. W początkowej fazie okresu trwałości ściernicy poziom drgań utrzymuje się na stałym, niskim poziomie. Po usunięciu pewnej objętości właściwej

materiału, poziom drgań zaczyna szybko narastać i po osiągnięciu punktu przegięcia drgania narastają znacznie wolniej. Objętość właściwą zaszlifowanego materiału odpowiadającą temu punktowi przegięcia można uznać za objętość wyznaczającą okres trwałości ściernicy ze względu na stan jej makrogeometrii. Drgania rozwijają się szybciej dla większych głębokości szlifowania i mniejszych prędkości przedmiotu.



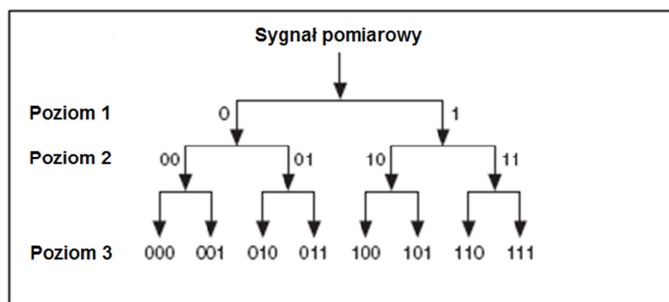
Rys. 8. Zmiany średniej wartości mocy widma drgań w okresie trwałości ściernicy w zakresie częstotliwości:
a) 600 – 1000 Hz, b) 1200 – 2000 Hz

Fig. 8. Change of the power spectrum average value during wheel life period in the frequency range of: a) 600 – 1000 Hz, b) 1200 – 2000 Hz

Zmiany średniej wartości widma mocy drgań w obu zakresach częstotliwości przebiegają podobnie. W początkowej fazie okresu trwałości ściernicy poziom drgań utrzymuje się na stałym, niskim poziomie. Po usunięciu pewnej objętości właściwej materiału, poziom drgań zaczyna szybko narastać i po osiągnięciu punktu przegięcia drgania narastają znacznie wolniej. Objętość właściwą zaszlifowanego materiału odpowiadającą temu punktowi przegięcia można uznać za objętość wyznaczającą okres trwałości ściernicy ze względu na stan jej makrogeometrii. Drgania rozwijają się szybciej dla większych głębokości szlifowania i mniejszych prędkości przedmiotu.

Do analizy sygnału drgań zastosowano również pakietową analizę falkową, dla której spełnienie tych warunków liniowości i stacjonarności sygnału nie jest wymagane [9]. Oprócz sygnału drgań, do nadzorowania rozwoju falistości ściernicy stosowany jest także sygnał wartości skutecznej emisji akustycznej (AERms) [3]. Z tego względu analizę falkową zastosowano również dla tego sygnału.

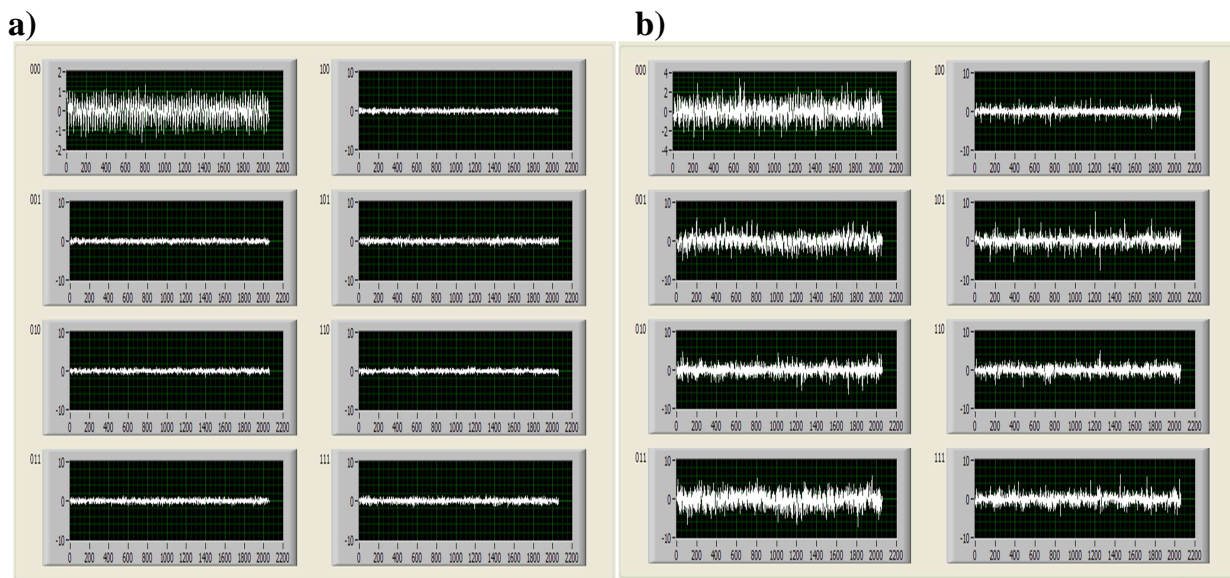
W transformacie falkowej sygnał jest dekomponowany na sumę ważoną funkcji lokalnych zwanych falkami. Pakietowa analiza falkowa jest odmianą tej transformaty, w której sygnał jest przetwarzany za pomocą tzw. banku dolno- i górnoprzepustowych oktawowych filtrów. Schemat takiej analizy do poziomu 3-go pokazuje rys. 9. W metodzie tej sygnał pomiarowy jest dzielony na poziomie 1-szym na wektor współczynników przybliżenia będący jego składową dolnoprzepustową (0) i wektor współczynników szczegółów będący jego składową górnoprzepustową (1). Proces ten jest powtarzany na każdym kolejnym poziomie dla każdej składowej poziomu poprzedniego. Tą metodą, w wyniku analizy na poziomie 3-cim otrzymujemy $2^3=8$ składowych sygnału oryginalnego, reprezentujących ten sygnał dla ośmiu kolejnych podzakresów częstotliwości pomiędzy zerem a połową częstotliwości próbkowania sygnału pomiarowego.



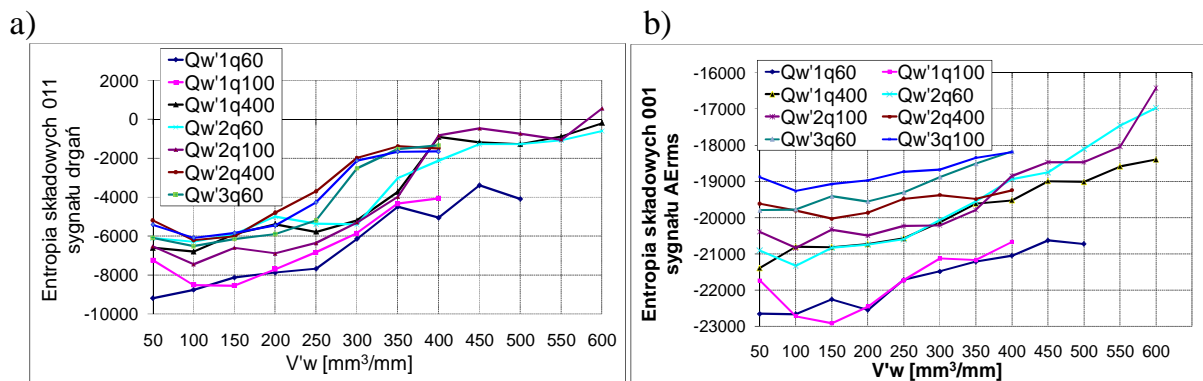
Rys. 9. Schemat pakietowej analizy falkowej do poziomu 3-go. 0 – składowa dolnoprzepustowa, 1 – składowa górnoprzepustowa

Fig.. 9. Wavelet packet decomposition tree at level three. 0 – lowpass component, 1 – highpass component

Rys. 10 przedstawia wyniki analizy za pomocą falki Symlet 8 na poziomie $j=3$ sygnału drgań dla serii prób przeprowadzonej z $Q_w'=2 \text{ mm}^3/\text{mms}$ i $q=60$, obejmującej cały okres trwałości ściernicy. Rys. 10a prezentuje wartości współczynników falkowych dla ściernicy o pełnej zdolności skrawnej, a rys. 10b dla całkowicie zużytej ściernicy. Oś rzędnych każdego wykresu to wartości współczynników falkowych dla każdej z ośmiu ($2^3=8$) składowych sygnału oryginalnego, reprezentujących ten sygnał dla ośmiu kolejnych podzakresów częstotliwości pomiędzy zerem a 5 kHz (połowa częstotliwości próbkowania sygnału drgań). Stąd np. składowa 000 reprezentuje sygnał z zakresie 0 – 625 Hz. Oś odciętych na wykresach to czas wyrażony liczbą próbek sygnału tak, że każda składowa jest reprezentacją sygnału w danym zakresie częstotliwości na całej długości jego trwania.



Rys . 10. Wyniki analizy za pomocą falki Symlet 8 na poziomie $j=3$ sygnału drgań dla serii prób z $Q_w'=2 \text{ mm}^3/\text{mms}$ i $q=60$, a) wykresy współczynników falkowych dla ściernicy o pełnej zdolności skrawnej po zeszlifowaniu $50 \text{ mm}^3/\text{mm}$ materiału, b) wykresy współczynników dla całkowicie zużytej ściernicy po zeszlifowaniu $600 \text{ mm}^3/\text{mm}$ materiału
 Fig. 10. Results of the wavelet packet analysis at level 3 with the aid of the Symlet 8 wavelet for $Q_w'=2 \text{ mm}^3/\text{mms}$ i $q=60$, a) wavelet coefficients for a sharp wheel after removing of $50 \text{ mm}^3/\text{mm}$ of the workpiece, b) coefficients for a worn wheel after removing of $600 \text{ mm}^3/\text{mm}$ of the workpiece



Rys. 11. Zmiana entropii współczynników falkowych w funkcji właściwego ubytku materiału obrabianego: a) składowej 011 sygnału drgań, b) składowej 001 sygnału wartości skutecznej emisji akustycznej
 Fig. 10. Change of the wavelet coefficients entropy as a function of the specific material removal: a) for the 011 component of the vibration signal, b) for the 001 component of the acoustic emission RMS signal

Pokazany przykład analizy falkowej sygnału drgań jest typowy również dla innych sygnałów pomiarowych. Na rys. 11 przedstawiono wyniki zastosowania pakietowej analizy falkowej sygnału drgań i sygnału wartości skutecznej emisji akustycznej do oceny zdolności skrawanej ściernicy. W obu przypadkach zastosowano falkę Szymlet 8 i poziom rozdzielczości 3. Jako miarę energii współczynników falkowych dla poszczególnych składowych przyjęto entropię określoną jako $\sum \log(w_i)^2$, gdzie w_i – współczynniki falkowe.

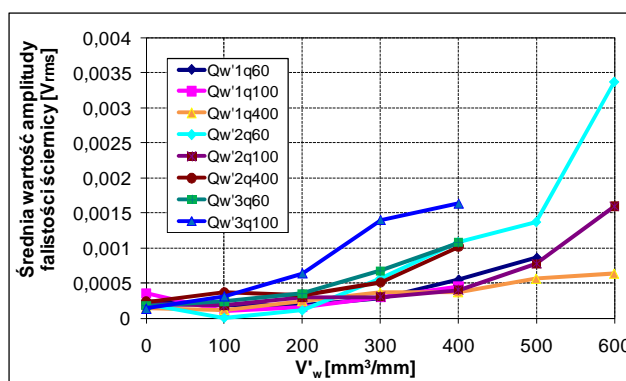
Dla sygnału drgań największą zmianę entropii dla wszystkich prób szlifowania zaobserwowano dla składowej 011, czyli w zakresie częstotliwości 1875 – 2500 Hz (rys. 11a). Jak już wspomniano, zakres częstotliwości 1875 – 2500 Hz odpowiada drugiej harmonicznej częstotliwości drgań samowzbudnych powstających w warunkach szlifowania w jakich prowadzono próby.

Dla sygnału AErms największe zmiany dla wszystkich prób szlifowania odnotowano dla składowej 001, czyli dla zakresu częstotliwości 625 – 1250 Hz (rys. 11b). Charakter tych zmian jest podobny jak dla sygnału drgań, chociaż względne przyrosty entropii są mniejsze. Można to tłumaczyć tym, że zmiany wartości skutecznej emisji akustycznej wiążą się ze spadkiem liczby ostrzy skrawających na czynnej powierzchni ściernicy. Ponadto, w przypadku przewagi samoostrzenia w zużyciu ściernicy, co miało miejsce podczas większości prób, zmiany te mają charakter okresowy i powodują, że sygnał jest mocno niestacjonarny. Stąd również wynika skuteczność analizy falkowej w przypadku tego sygnału. Dla wszystkich prób, wraz ze wzrostem właściwego ubytku materiału obrabianego, a zatem ze wzrostem zużycia ściernicy, następuje wyraźny przyrost współczynnika entropii.

3.2. KORELACJA WYBRANYCH MIAR STANU MAKROGEOMETRII CPS Z JEJ FALISTOŚCIĄ

W celu bezpośredniej oceny stanu makrogeometrii CPS wykonywano pomiary falistości CPS. Umożliwiło to jej skorelowanie z cechami sygnału drgań i wartości skutecznej EA wyznaczonymi w rozdziale 3.1.

Na każdy pomiar falistości ściernicy składa się co najmniej 7500 próbek pomiarowych wyznaczanych z krokiem próbkowania 0,2 mm, co daje długość pełnego obwodu ściernicy. Analiza harmoniczna tych profili pozwala na ocenę falistości i błędów kształtu CPS. Składowe harmoniczne występujące w zarysach profili CPS odpowiadają różnym częstościom fal na obwodzie ściernicy. Jako miarę falistości CPS przyjęto średnią amplitudę widma mocy jej zarysu obwodowego w zakresie powyżej 5 fal/obwód. Wyniki tej analizy przedstawia rys. 12.



Rys. 12. Zmiany amplitudy falistości ściernicy w okresie jej trwałości
Fig. 12. Change of the wheel waviness amplitude during wheel life period

Dla określenia siły powiązania pomiędzy amplitudą falistości CPS a wyznaczonymi w rozdziale 3.1 miarami stanu jej makrogeometrii obliczono współczynniki korelacji liniowej Pearsona między zmiennymi reprezentującymi te wielkości w funkcji właściwego ubytku materiału obrabianego. Wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli 1. Większość współczynników przekracza wartość 0,9. Najwyższe wartości korelacji z falistością CPS odnotowano dla średniej mocy widma drgań w zakresie 1200 – 2000 Hz oraz dla entropii współczynników falkowych sygnału wartości skutecznej emisji akustycznej w zakresie 625 – 1250 Hz. potwierdza dużą przydatność wyznaczonych miar stanu makrogeometrii CPS.

Tabela 1. Współczynnik korelacji liniowej amplitudy falistości CPS z wybranymi miarami stanu jej makrogeometrii
Table 1. Linear correlation coefficients between the wheel waviness amplitude and the selected wheel macro-geometry measures

Parametry szlifowania	Współczynnik korelacji liniowej amplitudy falistości CPS z:			
	Śr. moc widma drgań 600-1000 Hz	Śr. moc widma drgań 1200-2000 Hz	Entropią DWT drgań 1875-2500 Hz	Entropią DWT AErms 625- 1250 Hz
Q'_w1q60	0,84837	0,92593	0,91443	0,89422
Q'_w1q100	0,99984	0,99297	0,99919	0,97410
Q'_w1q400	0,94598	0,95096	0,87455	0,96242
Q'_w2q60	0,83904	0,95197	0,85420	0,93918
Q'_w2q100	0,47153	0,96564	0,77385	0,95256
Q'_w2q400	0,77164	0,81094	0,76811	0,85726
Q'_w3q60	0,91938	0,97229	0,96497	0,99883
Q'_w3q100	0,97925	0,98596	0,99219	0,95365

4. NADZOROWANIE MIKROGEOMETRII CPS

Ważnym parametrem stanu procesu, powszechnie uważanym za dobrze skorelowany ze stanem mikrogeometrii CPS jest siła szlifowania oraz wszystkie wielkości od niej pochodne. Ponadto, analiza literatury wskazuje na związek sygnału EA z parametrami mikrogeometrii CPS [3, 4].

Zależność siły szlifowania od parametrów mikrogeometrii CPS rozważono w oparciu o model opracowany przez Lichun'a i Jizai [11], który zakłada podział składowych siły szlifowania na składowe związane z tworzeniem wióra oraz składowe związane z tarciem ziaren o powierzchnie przedmiotu i wiórów. Analiza tego modelu pokazuje, że parametry mikrogeometrii CPS, opisane na rys. 4, istotnie wpływają na wartość składowych siły szlifowania. Nie oznacza to jednak, że monitorowanie siły szlifowania zapewnia wiarygodną diagnostyką zdolności skrawnej ściernicy. Wynika to z dwóch powodów.

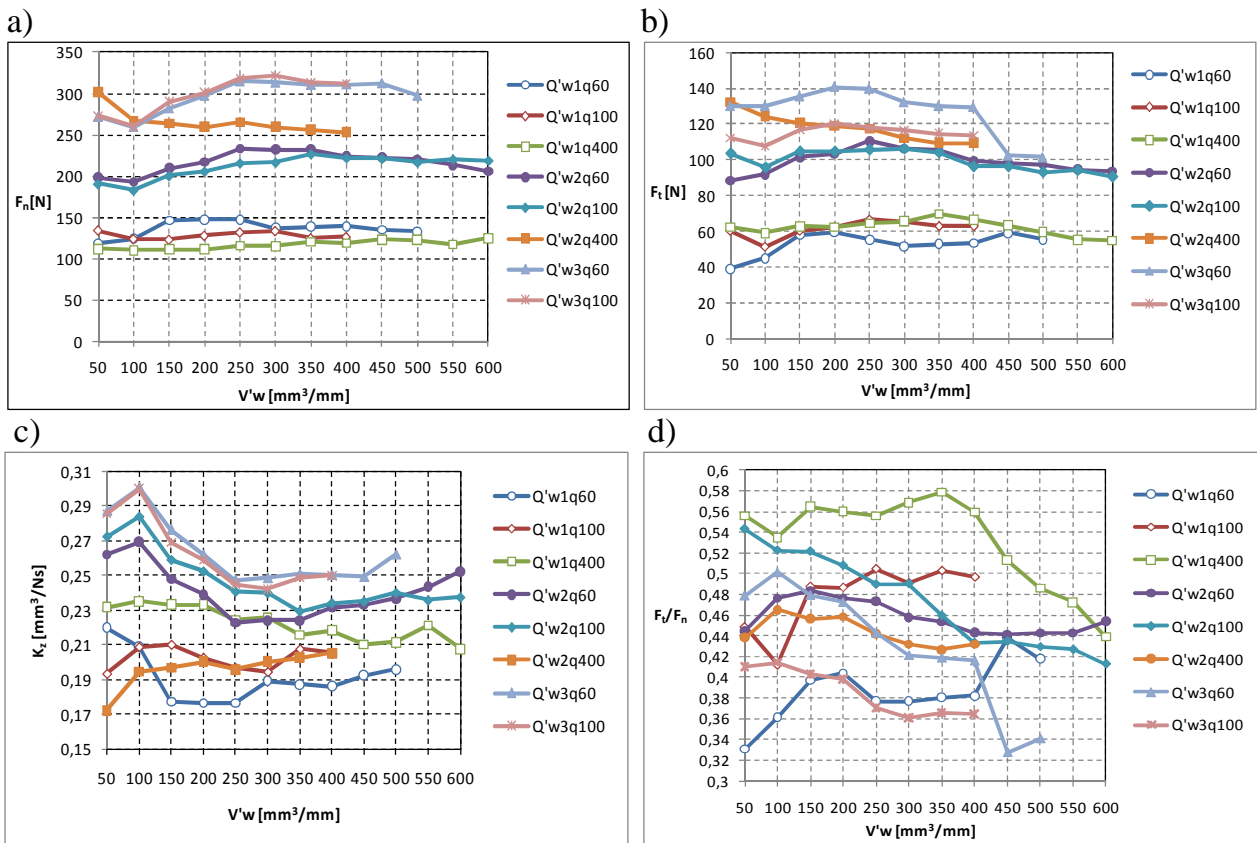
Po pierwsze, przebieg zjawisk składających się na proces zużywania się ściernicy w okresie jej trwałości rzadko ma charakter monotoniczny. Bardzo często początkowa dominacja zużycia poprzez ścieranie się wierzchołków ziaren, na skutek wzrostu obciążenia pojedynczych ziaren lub zalepiania porów prowadzi do wykruszania i pękania ziaren czyli pojawienia się zjawiska samoostrzenia, a każdemu mechanizmowi zużycia ściernicy odpowiada inny przebieg składowych siły szlifowania.

Po drugie, analizowane zależności nie uwzględniają wpływu na wielkość siły szlifowania szeregu zakłóceń związanych z dynamiką procesu oraz oddziaływaniem zjawisk cieplnych i chemicznych, a także wpływu zastosowanych parametrów nastawnych szlifowania i obciążania ściernicy.

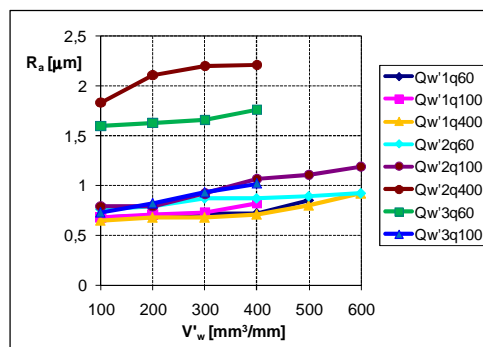
Wnioski te potwierdzają wykresy zmian składowej normalnej i stycznej, ich stosunku oraz współczynnika zdolności skrawnej K_z (rozumianego jako stosunek wydajności objętościowej szlifowania w jednostce czasu do wartości składowej normalnej) od objętości właściwej zeszlifowanego materiału – rys. 13. Z wykresów tych wynika, że zależność analizowanych potencjalnych miar stanu procesu związanych z siłą szlifowania od objętości właściwej zeszlifowanego materiału nie jest jednoznaczna. Brak jest również korelacji składowych siły szlifowania i wskaźników na nich opartych z chropowatością powierzchni – rys. 14. Prawdopodobnie, w miarę upływu okresu trwałości ściernicy chropowatość rośnie ze względu na nieuchronny rozwój drgań samowzbudnych.

Wyniki doświadczalne wskazują więc na brak możliwości wiarygodnego nadzorowania procesu wyłącznie na podstawie miar wyprowadzanych z sygnałów pomiarowych składowych siły szlifowania. Mogą one jednak być z pożytkiem stosowane jako składowe wektora wejściowego modelu różnych symptomów stanu procesu szlifowania.

Analiza źródeł powstawania sygnału emisji akustycznej wskazuje, że z parametrami mikrogeometrii CPS powinny być skorelowane cechy tego sygnału. Korelacja ta powinna być bardziej widoczna dla sygnału surowego EA. Z definicji, wartość skuteczna uśrednia wartości kolejnych próbek sygnału czyniąc sygnał mało wrażliwym na zdarzenia krótkotrwałe, takie np. jak pęknięcie ziaren. Zmiany zachodzące w rozkładzie ziaren na CPS w wyniku zużycia mogą być ujawnione poprzez zastosowanie opisu sygnału w dziedzinie czasu jak i częstotliwości za pomocą różnego rodzaju miar statystycznych.



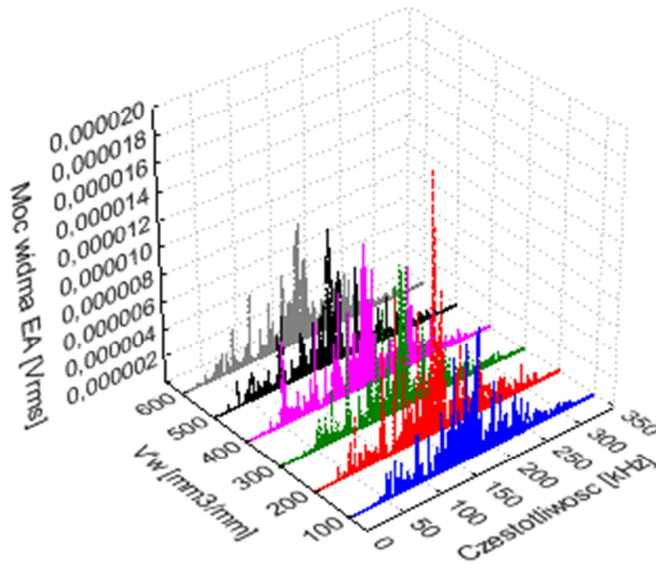
Rys. 13. Zmiany w okresie trwałości ściernicy: a) składowej normalnej siły szlifowania, b) składowej stycznej siły szlifowania, c) współczynnika zdolności skrawnej K_c , d) stosunku składowej stycznej do normalnej siły szlifowania, w okresie trwałości ściernicy
 Fig. 13. Change of: a) normal force, b) tangential force, c) cutting ability coefficient K_c , d) ratio of tangential to normal force, during grinding wheel life period



Rys. 14. Zmiany chropowatości powierzchni szlifowanej w okresie trwałości ściernicy
 Fig. 14. Change of the workpiece roughness during grinding wheel life period

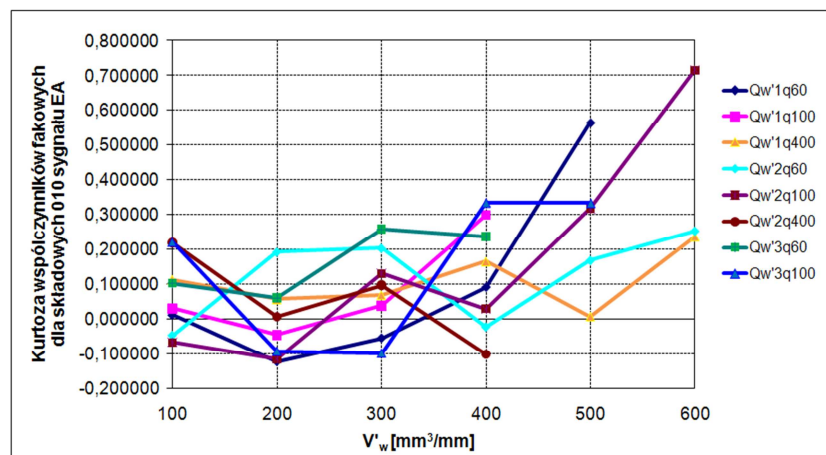
Rys. 15 przedstawia typowy przebieg zmian widma sygnału EA w okresie trwałości ściernicy. Kolejne przebiegi mocy widmowej sygnału EA w całym okresie trwałości ściernicy mają zwiększone wartości w zakresie od około 50 do 300 kHz, nie wykazują jednak zależności od objętości właściwej zeszlifowanego materiału. A zatem, analiza DFT sygnału EA nie daje zadowalających wyników z punktu widzenia znalezienia symptomów

zużycia ściernicy. Wynika to prawdopodobnie z niestacjonarności i nieliniowości tego sygnału. Bardziej odpowiednią metodą analizy takich sygnałów jest transformata falkowa.



Rys. 15. Zmiany widma sygnału EA w okresie trwałości ściernicy podczas szlifowania z $Q'_w=2 \text{ mm}^3/\text{mms}$ i $q=100$
 Fig. 15. Change of the acoustic emission signal spectrum during grinding wheel life period for $Q'_w=2 \text{ mm}^3/\text{mms}$ and $q=100$

Na rys. 16 przedstawiono wyniki zastosowania pakietowej analizy falkowej sygnału emisji akustycznej do oceny zdolności skrawanej ściernicy. Rysunek przedstawia zmiany kurtozy składowej 010 odpowiadającej zakresowi częstotliwości 125 – 187,5 kHz, czyli zakresowi, w którym sygnał wykazuje największą moc. Zastosowano falkę Symlet 8 i poziom rozdzielczości 3.



Rys. 16. Zmiana kurtozy składowych 010 sygnału EA w funkcji właściwego ubytku materiału obrabianego
 Fig. 16. Change of kurtosis of the wavelet packet analysis 010 component as a function of the specific material removal

Uśrednione przebiegi wartości kurtozy sygnału EA wykazują tendencję wzrostową wraz ze wzrostem właściwej objętości zeszlifowanego materiału od początku okresu trwałości ściernicy, a więc skupienie rozkładu wartości sygnału EA wokół wartości średniej wzrasta wraz ze zużyciem ściernicy. Wyjątek stanowi przypadek szlifowania z $Q'_w = 2 \text{ mm}^3/\text{mms}$ i z bardzo niską prędkością obwodową przedmiotu ($q=400$), dla którego po wszystkich cyklach szlifowania składających się na okres trwałości ściernicy stwierdzono wystąpienie przypaleń (rozdział 5). Dla tego przypadku wartości kurtozy wykazują dużą zmienność wokół mniej więcej stałej wartości średniej w okresie trwałości ściernicy. Można to wyjaśnić tym, że zmiany strukturalne zachodzące w warstwie wierzchniej przedmiotu w wyniku przypaleń mają wpływ na generowany przez proces szlifowania sygnał EA, zakłócając zachodzące w tym sygnale zmiany spowodowane zużyciem mikrogeometrii ściernicy. Oznacza to, że kurtoza EA nie jest dobrą miarą zużycia ściernicy w przypadku występowania uszkodzeń cieplnych i przypaleń.

Zastosowanie surowego sygnału EA do nadzorowania mikrogeometrii CPS można podsumować w następujący sposób:

- Analiza amplitudowo-częstotliwościowa sygnału AE za pomocą DFT nie daje zadowalających rezultatów ze względu na niestacjonarność i nieliniowość tego sygnału. Bardziej odpowiednia jest analiza czasowo- częstotliwościowa za pomocą transformaty falkowej.
- Efektywność zastosowania współczynnika kurtozy może być zwiększona poprzez wyznaczenie jego wartości dla współczynników falkowych składowych sygnału EA w zakresie częstotliwości, dla których sygnał wykazuje największą moc.
- Kurtoza EA nie jest dobrą miarą zużycia CPS w przypadku wystąpienia uszkodzeń cieplnych lub przypaleń powierzchni przedmiotu.

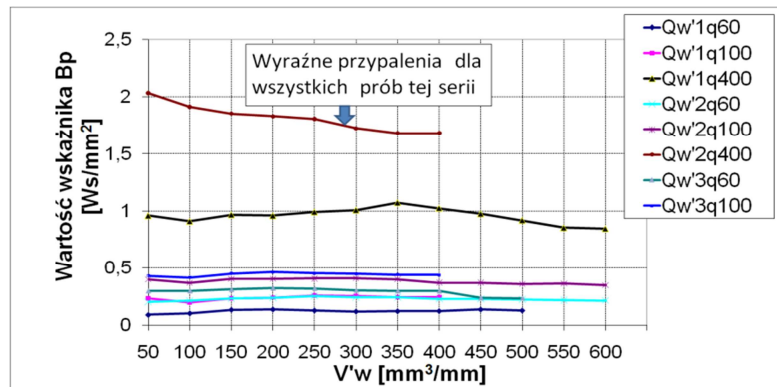
5. NADZOROWANIE USZKODZEŃ CIEPLNYCH

Z prac B. Kruszyńskiego [5] i R. Wójcika [16] wynika, że nadzorowanie niekorzystnych zmian zachodzących w warstwie wierzchniej przedmiotu podczas szlifowania w wyniku oddziaływania zjawisk cieplnych może być efektywnie realizowane poprzez wyznaczenie wskaźnika B_p , który jest iloczynem właściwej mocy szlifowania i czasu kontaktu dowolnego punktu na powierzchni przedmiotu ze ściernicą podczas jego jednego obrotu. R. Wójcik wykazał eksperymentalnie dla bardzo wielu rodzajów stali i ściernic, że naprężenia własne w warstwie wierzchniej rosną liniowo wraz ze wzrostem tego wskaźnika. Natomiast w zależności mikrotwardości warstwy wierzchniej od wskaźnika B_p [5] następuje skokowy jej spadek dla pewnej wartości B_p , od którego rozpoczyna się powolny spadek mikrotwardości, aż do wystąpienia przypaleń. Dla konkretnych warunków szlifowania, tę graniczną wartość B_p można łatwo wyznaczyć doświadczalnie.

Na rys. 17 pokazano zmiany wartości wskaźnika B_p w okresie trwałości ściernicy dla wszystkich przeprowadzonych prób szlifowania.

Wartości B_p dla dwóch zestawów parametrów szlifowania wyraźnie odbiegają od pozostałych. Są to próby szlifowania z bardzo małą prędkością obwodową przedmiotu

($q = 400$). Dla $q = 400$ oraz $Q'_w = 2 \text{ mm}^3/\text{mms}$ wartość wskaźnika wzrasta średnio do około $1,8 \text{ Ws}/\text{mm}^2$ i dla wszystkich cykli szlifowania w tej serii stwierdzono wystąpienie wyraźnych przypaleń na powierzchni przedmiotu. Dla $q = 400$ i $Q'_w = 1 \text{ mm}^3/\text{mms}$ przypalenia nie wystąpiły ale można przypuszczać, że podwyższona wartość B_p oznacza przekroczenie temperatury warstwy wierzchniej, powyżej której rozpoczynają się jej uszkodzenia cieplne. Stan zdolności skrawnej ściernicy praktycznie nie ma znaczenia dla wartości wskaźnika B_p .



Rys. 17. Zmiany wartości wskaźnika B_p w okresie trwałości ściernicy
Fig. 17. Change of the B_p coefficient during grinding wheel life period

Analiza wartości wskaźnika B_p w przeprowadzonych badaniach doświadczalnych potwierdza jego przydatność do nadzorowania zjawisk cieplnych podczas szlifowania węgłnego stali. Dla konkretnych warunków szlifowania, możliwe jest stosunkowo szybkie doświadczalne wyznaczenie wartości B_p , dla której pojawiają się przypalenia powierzchni szlifowanej. Ta wartość odpowiednio obniżona (np. dwukrotnie) może następnie służyć jako wartość graniczna w nadzorowaniu uszkodzeń cieplnych.

6. PODSUMOWANIE

1. Najefektywniejszą metodą utrzymania procesu szlifowania w stanie akceptowalnym z punktu widzenia jego przebiegu oraz jakości technologicznej przedmiotu po szlifowaniu jest ciągłe monitorowanie wielkości procesowych, których wybrane cechy skorelowane są ze stanem zużycia ściernicy oraz zjawiskami fizycznymi ograniczającymi ten akceptowalny stan procesu.
2. Duży potencjał przydatności poszczególnych sygnałów pomiarowych zawarty jest w miarach opisujących ich cechy dynamiczne. Ujawnienie tych cech wymaga zastosowania zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów.
3. Klasyfikacja stanu procesu będzie znacznie bardziej wiarygodna jeśli zostanie przeprowadzona w oparciu o więcej niż jeden symptom. Wymaga to posłużenia się modelem zależności pomiędzy wielkościami wyjściowymi procesu wybranymi do oceny jego stanu a wyznaczonymi symptomami tego stanu.

4. Otrzymane wyniki mogą być zastosowane do budowy modeli stanu ściernicy i procesu szlifowania oraz pozwalają na ustalenie ogólnych zaleceń dla realizacji zautomatyzowanych systemów nadzorowania procesu szlifowania węgelnego.

LITERATURA

- [1] ALTINAS Y., WECK M., 2004, *Chatter Stability of Metal Cutting and Grinding*, Annals of the CIRP, 53/2.
- [2] HAMROL A., 1990, *Teoretyczna i doświadczalna analiza możliwości diagnostyki i nadzorowania procesu szlifowania wewnętrznego*, Politechnika Poznańska, Rozprawy Nr 245, Poznań.
- [3] INASAKI I., 1998, *Sensor Fusion for Monitoring and Controlling Grinding Processes*, Proc. 5th Int. Conf. on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing AC'98, Warszawa, 23-32.
- [4] INASAKI I., KARPUSZEWSKI B., LEE H.-S., 2001, *Grinding Chatter – Origin and Suppression*, Annals of the CIRP, 50/2.
- [5] KRUSZYŃSKI B., 2001, *Surface integrity in grinding*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Seria Monografie, Łódź.
- [6] LAJMERT P., 2003, *Wykorzystanie metod sztucznej inteligencji do sterowania i optymalizacji procesu szlifowania wzdłużnego wałków*, Praca doktorska, Politechnika Łódzka.
- [7] LEŻAŃSKI P., LAJMERT P., 2004, *Zastosowanie parametrów krzywej udziału materiałowego do oceny zużycia ściernicy*, Zeszyty Naukowe Wydz. Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej Nr 36, XXVII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Sarbinowo, wrzesień, 75-282.
- [8] LEŻAŃSKI P., LAJMERT P., LEWANDOWSKI D., RAFAŁOWICZ J., TEODORCZYK J., WRĄBEL D., 2001, *Automatyczny nadzór procesu szlifowania wzdłużnego*, Sprawozdanie z projektu badawczego KBN nr 7T07D03014, Łódź.
- [9] LEŻAŃSKI P., 2008, *Monitorowanie stanu ściernicy z zastosowaniem analizy falkowej*, W „Wybrane problemy obróbki ściernej” pod red. C. Niżankowskiego, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Bochnia, 225-234.
- [10] LEŻAŃSKI P., 2010, *Wykorzystanie pomiaru drgań do nadzorowania makrogeometrii CPS*, W „Podstawy i technika obróbki ściernej” pod red. A. Gołąbczaka i B. Kruszyńskiego (Materiały XXXIII NSOŚ), Łódź.
- [11] LICHUN L., JIZAI F., 1980, *A Study of Grinding Force Mathematical Model*, Annals of the CIRP, 29/1, 245-249.
- [12] MARIS M., SNOEYS R., PETERS J., 1975, *Analysis of plunge grinding operations*, Annals of the CIRP, 24/2, 225-230.
- [13] PRUSKI P., 2007, *Pomiar wielkości charakteryzujących proces szlifowania za pomocą urządzeń wirtualnych w środowisku LabVIEW*, Praca dyplomowa pod kier. P. Leżańskiego, Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny.
- [14] SNOEYS R., BROWN D., 1969, *Dominating parameters in grinding wheel and workpiece regenerative chatter*, Proceedings of the 10-th Machine Tool Design and Research Conference, 325-348.
- [15] WECK M., SCHIEFER K.H., 1979, *Interaction of the dynamic behavior between machine tool and cutting process for grinding*, Annals of the CIRP, 28/1.
- [16] WÓJCIK R., 2006, *Wpływ strumienia energii szlifowania na wybrane właściwości warstwy wierzchniej*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Seria Rozprawy Naukowe, Z. 351, Łódź.

PERFORMANCE EVALUATION OF THE SELECTED PROCESS VARIABLES IN PLUNGE GRINDING AUTOMATIC SUPERVISION

In the paper, an efficient way of several sensors fusion for grinding wheel wear and some process outputs model building during the external cylindrical grinding is presented and the performance of the system is experimentally evaluated. The sensors of grinding force components, chatter vibration, and acoustic emission are used. First, the training and testing sets of data has been established. A level of the grinding wheel wear has been assigned to every data sample using especially designed sensors for tactile measurements of the wheel topography features. The principle of this measuring system is based on the technology of surface roughness measurement. The process state has been verified by measurements of the workpiece roughness and shape error. The laboratory research presented in the paper focuses mainly on a search for the best configuration signal processing methods. Different feature selection methods

have been used to establish an optimal set of informative features as process state symptoms. The selected features can be used for the process state model building. The research results allow to find out general recommendations for building of the automated supervisory systems for plunge grinding processes.

PODZIĘKOWANIE

Badania zrealizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.