

Paweł LAJMERT¹
Bogdan KRUSZYŃSKI¹

IDENTYFIKACJA WCZESNYCH SYMPTOMÓW NIEPOŻĄDANYCH STANÓW PROCESU W SZLIFOWANIU KŁOWYM WAŁKÓW

W artykule przedstawiono niezawodny system identyfikacji zużycia ściernicy i parametrów jakości przedmiotu obrabianego w procesie szlifowania kłowego wałków. Opracowano model dynamiczny procesu szlifowania z uwzględnieniem rozwoju falistości na przedmiocie i ściernicy. Model ten posłużył do wstępnego wyznaczenia optymalnego zakresu parametrów szlifowania. Następnie w oparciu o metodę empirycznej dekompozycji sygnału utworzono zbiór cech sygnału drgań i surowego sygnału emisji akustycznej w celu identyfikacji niepożądanych stanów procesu szlifowania. Do wyznaczenia istotności poszczególnych cech sygnałów zastosowano metodę analizy składowych głównych. Przeprowadzono analizę sygnału emisji akustycznej pod kątem diagnozowania stanu czynnej powierzchni ściernicy. Dokonano przeglądu różnych metod w celu wyznaczenia reguł decyzyjnych oraz modelowania procesu podejmowania decyzji o stanie procesu szlifowania.

1. WPROWADZENIE

Celem inteligentnego systemu sterowania procesu szlifowania jest w pierwszej kolejności wybór wstępnych parametrów kinematycznych szlifowania dla kolejnych faz cyklu szlifowania, a następnie diagnozowanie wczesnych symptomów zużycia ściernicy i niepożądanych stanów procesu, aby możliwa była ciągła lub stopniowa zmiana parametrów obróbki tak aby utrzymać proces w optymalnym obszarze szlifowania ze względu na unikanie rozwoju drgań samowzbudnych i uszkodzeń cieplnych przedmiotu obrabianego. Gdy granice optymalnego obszaru szlifowania są znane możliwe jest zaprojektowanie wstępnego przebiegu procesu w kolejnych fazach cyklu szlifowania bez niebezpieczeństwa powstawania drgań samowzbudnych i uszkodzeń cieplnych przedmiotu, co w efekcie przekłada się na wysokie parametry jakości warstwy wierzchniej przedmiotu.

Do tej pory wiele pracy włożono w opracowanie modeli analitycznych dynamiki procesu szlifowania [1,2] oraz modeli numerycznych [3], które jednakże nie uwzględniały rzeczywistych geometrycznych interakcji pomiędzy przedmiotem obrabianym a ściernicą w wyniku rozwoju falistości na przedmiocie i ściernicy. Prace poświęcone temu problemowi są bardzo nieliczne [4].

¹ Politechnika Łódzka, Instytut Obrabiarek i TBM ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź,
e-mail: plajmert@p.lodz.pl, bogdan.kruszynski@p.lodz.pl

Dlatego w pierwszej kolejności opracowano ulepszony model procesu szlifowania, który byłby w stanie symulować rozwój gwałtownie narastających drgań samowzbudnych związanych z rozwojem falistości na przedmiocie oraz powolnie narastających drgań samowzbudnych związanych z rozwojem falistości na ściernicy. Ponadto opracowano model cieplny przedmiotu obrabianego i ściernicy z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Modele te pozwoliły na wstępne ustalenie optymalnego obszaru szlifowania.

Jednakże, z powodu nieuniknionych niedokładności modelowania procesu szlifowania, używania się ściernicy oraz szeregu innych zakłóceń, kolejnym problemem w fazie realizacji procesu szlifowania jest identyfikacja wczesnych symptomów niepożądanych stanów procesu w celu utrzymania procesu w optymalnym obszarze szlifowania oraz aktywnej kompensacji tych zakłóceń lub w ostateczności w celu podjęcia decyzji o kondycjonowaniu ściernicy. Celem prowadzonych prac jest zatem opracowanie inteligentnego systemu szlifowania dla procesu szlifowania kłowego wałków, który by:

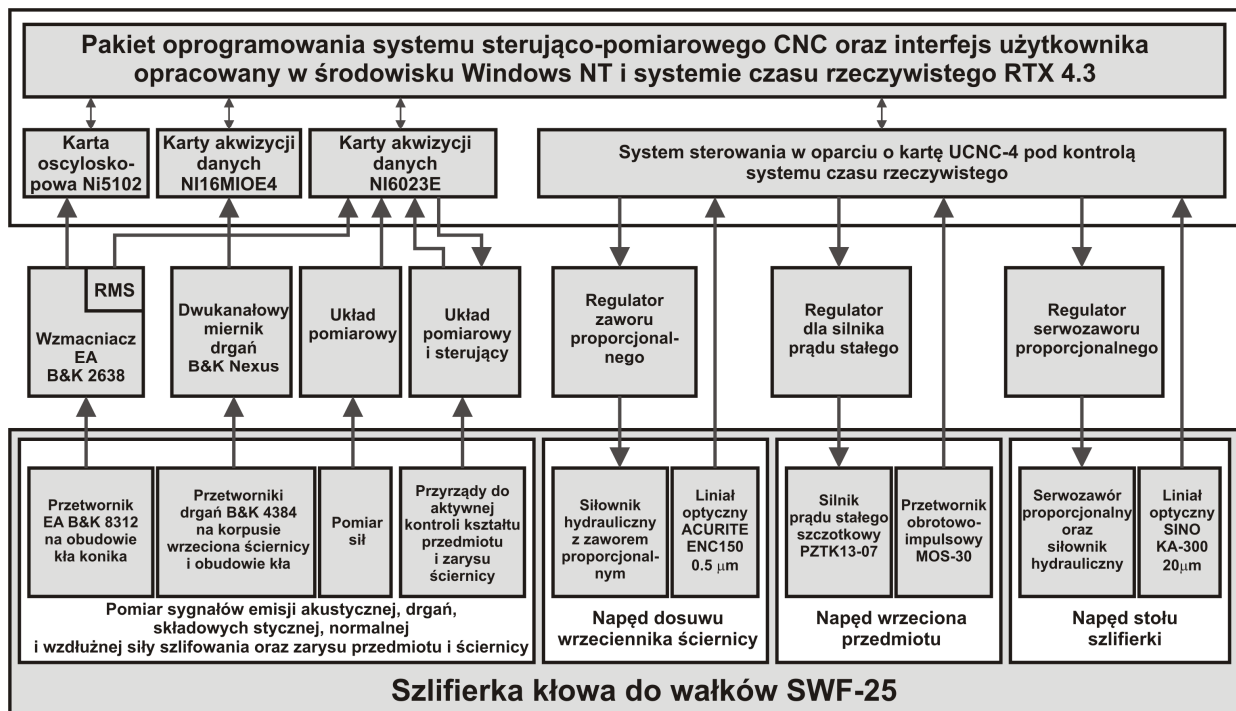
- automatycznie dobierał najodpowiedniejszą ściernicę i wydatek chłodziwa dla danego materiału obrabianego,
- dokonywał automatycznego wyboru strategii algorytmów sterowania i optymalizacji procesu szlifowania w zależności od konkretnego przypadku technologicznego,
- samodzielnie dobierał wstępne parametry kinematyczne szlifowania z wykorzystaniem systemów baz danych oraz innych modeli procesu szlifowania,
- dokonywał automatycznej detekcji i kompensacji zużycia narzędzia ściernego,
- dokonywał detekcji i kompensacji odkształceń geometrycznych i cieplnych przedmiotów obrabianych poprzez bieżącą modyfikację trajektorii ruchu ściernicy w funkcji kształtu i wymiaru przedmiotu,
- automatycznie wykrywał sytuacje awaryjne, takie jak uszkodzenie układów pomiarowych,
- był odpowiednio zintegrowany z systemem sterowania CNC szlifierki i pozwalał na wymianę danych w celu bieżącej modyfikacji przebiegu cyklu szlifowania w wyniku zidentyfikowanych zakłóceń,
- douczał się automatycznie na podstawie błędnych ocen wyników szlifowania.

Opracowanie takiego systemu szlifowania jest obecnie przedmiotem prac prowadzonych w Instytucie Obrabiarek i TBM PŁ w szczególności dla materiałów trudnoobrabialnych stosowanych między innymi w przemyśle lotniczym.

2. STANOWISKO BADAWCZE

Badania procesu szlifowania zostały przeprowadzone na różnych zmodernizowanych szlifierkach kłowych do wałków zaopatrzonych w odpowiednie karty sterujące i pomiarowe. Podczas prób szlifowania wykorzystywano ściernicę ceramiczną 38A80KVBE. Szlifowane próbki wykonano ze stali 38HMJ ulepszonej do twardości 50 ± 2 HRC. Badania zostały przeprowadzone dla różnych obszarów szlifowania związanych z uszkodzeniami cieplnymi przedmiotu obrabianego oraz rozwojem drgań samowzbudnych. Szlifowanie w cyklach

prowadzane było aż do całkowitego zużycia ściernicy. W celu scharakteryzowania procesu szlifowania rejestrowano składowe siły szlifowania, drgania przedmiotu, sygnał RMS oraz surowy sygnał emisji akustycznej. Ponadto rejestrowano błędy zarysu przedmiotu obrabianego z wykorzystaniem specjalnie opracowanego przyrządu do aktywnej kontroli wymiaru i kształtu [5]. Po każdej próbie szlifowania rejestrowano również zarys CPS ściernicy. W celu rejestracji tych danych opracowano specjalne oprogramowanie kontrolno-pomiarowe pracujące pod kontrolą systemu operacyjnego Windows NT oraz systemu czasu rzeczywistego RTX [5]. Strukturę układów kontrolno-pomiarowych dla szlifierki SWF-25 przedstawiono na rysunku 1 [5,6,7].



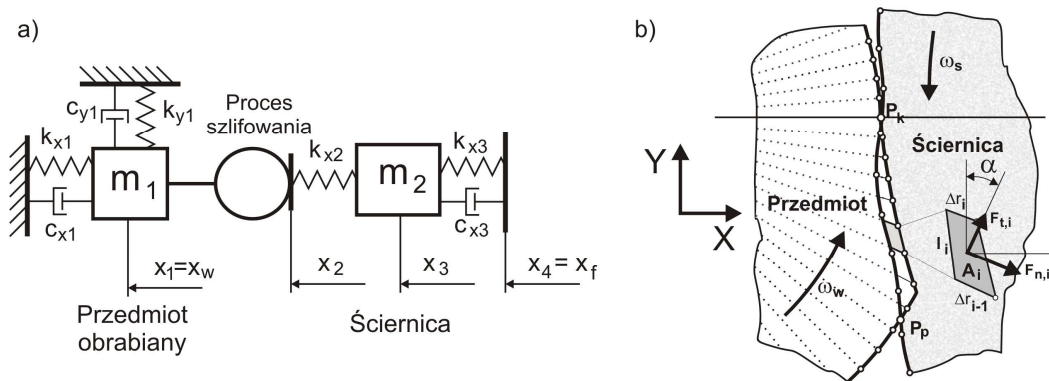
Rys. 1. Struktura układów sterujących i pomiarowych stanowiska badawczego

Fig. 1. Structure of control and measurement systems of the test stand

3. MODEL DYNAMIKI PROCESU SZLIFOWANIA

W celu uzyskania zależności pomiędzy sygnałem drgań, falistością ściernicy i wynikowymi błędami kształtu przedmiotu obrabianego opracowano model procesu szlifowania uwzględniający rzeczywiste interakcje geometryczne pomiędzy przedmiotem obrabianym a ściernicą [8]. Model fizyczny układu masowo-sprężystego szlifierki oraz model geometrii przedmiotu i ściernicy przedstawiono na rysunku 2. Geometrię przedmiotu i ściernicy zamodelowano poprzez zdefiniowanie punktów podporowych rozmieszczonych równomiernie na obwodzie przedmiotu i ściernicy, rysunek 2b. Pozwoliło to na wyznaczenie rzeczywistej objętości materiału obrabianego wnikającego w roboczą powierzchnię

ściernicy oraz innych parametrów styku przedmiotu ze ściernicą, takich jak maksymalna grubość wióra, czy długość linii styku ściernicy z przedmiotem.



Rys. 2. Model fizyczny procesu szlifowania a) oraz model relacji geometrycznych pomiędzy ściernicą a przedmiotem obrabianym b)

Fig. 2. Physical model of grinding process a) and model of geometrical relations between a grinding wheel and a workpiece b)

Procedura wyznaczania wzajemnych przemieszczeń przedmiotu i ściernicy obejmuje:

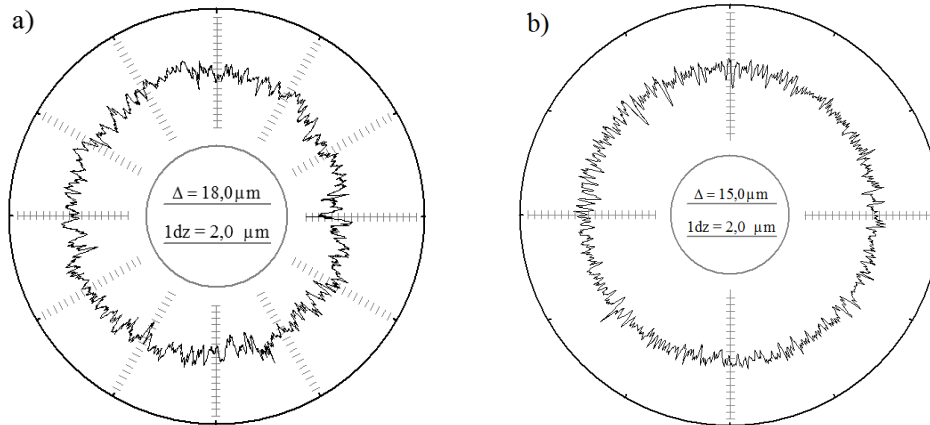
- przemieszczenie i obrót przedmiotu oraz ściernicy o kąt wynikający z ich prędkości obrotowych i prędkości dosuwu ściernicy,
- wyznaczenie parametrów styku ściernicy z przedmiotem (zarysu pola styku, maksymalnej grubości wióra h_{max} oraz długości linii styku ściernicy z przedmiotem l_g),
- wyznaczenie składowych siły szlifowania na podstawie parametrów przekroju styku ściernicy z przedmiotem w wyniku całkowania pola styku ściernicy i przedmiotu wzdłuż linii styku,
- przemieszczenie ściernicy i przedmiotu wynikające z modelu masowo-sprężystego szlifierki,
- przemieszczenie punktów podporowych ściernicy w wyniku zużywania się i wykruszania ziarn ściernych,
- przemieszczenie punktów podporowych przedmiotu do miejsca kontaktu ze ściernicą.

W opracowanym modelu procesu szlifowania składową styczną i normalną siły szlifowania wyznaczano jako sumę składowych dla poszczególnych segmentów wzdłuż linii styku ściernicy z przedmiotem, wzór (1). Obliczone w ten sposób składowe siły szlifowania posłużyły następnie do wyznaczania wzajemnych przemieszczeń przedmiotu i ściernicy z wykorzystaniem masowo-sprężystego modelu szlifierki.

$$\begin{bmatrix} F_n \\ F_t \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{n_{segm.}} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_X A_i \\ K_Y A_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie: F_n , F_t – składowe normalna i styczna siły szlifowania, $n_{segm.}$ – liczba segmentów wzdłuż linii styku przedmiotu ze ściernicą, α – kąt pomiędzy siłą szlifowania F a osią X (zobacz rysunek 2b), K_X , K_Y – parametry zdolności skrawnej ściernicy w kierunku osi X i Y, A_i – pole kontaktu przedmiotu ze ściernicą dla i-tego segmentu.

Przedstawiony model procesu szlifowania pozwolił na wyznaczenie relacji pomiędzy amplitudą przemieszczeń przedmiotu x_w a wynikową amplitudą falistości na ściernicy i przedmiocie obrabianym. Przykładowe zarysy przedmiotu obrabianego uzyskane podczas prób doświadczalnych oraz podczas symulacji przedstawiono na rysunku 3.

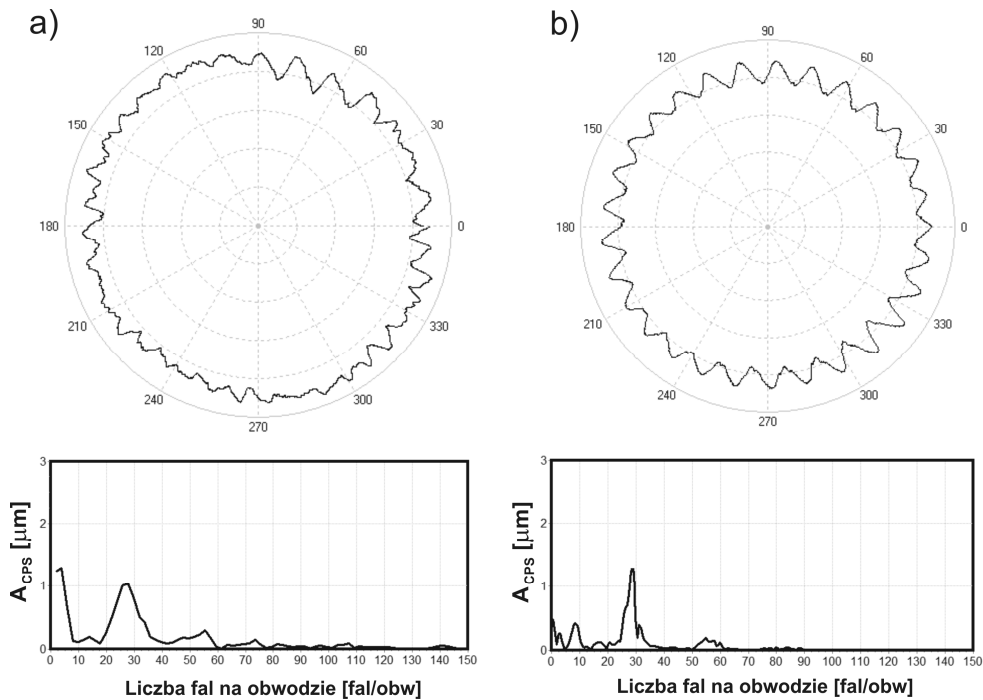


Rys. 3. Porównanie zarysu przedmiotu otrzymanego: a) podczas badań eksperymentalnych; b) podczas symulacji ($d_w = 110$ mm; $n_w = 2$ obr/s; $v_f = 10$ $\mu\text{m/s}$; $b_w = 26$ mm)

Fig. 3. Comparison of workpiece shape obtained: a) during experimental test; b) during simulation ($d_w = 110$ mm; $n_w = 2$ rev/s; $v_f = 10$ $\mu\text{m/s}$; $b_w = 26$ mm)

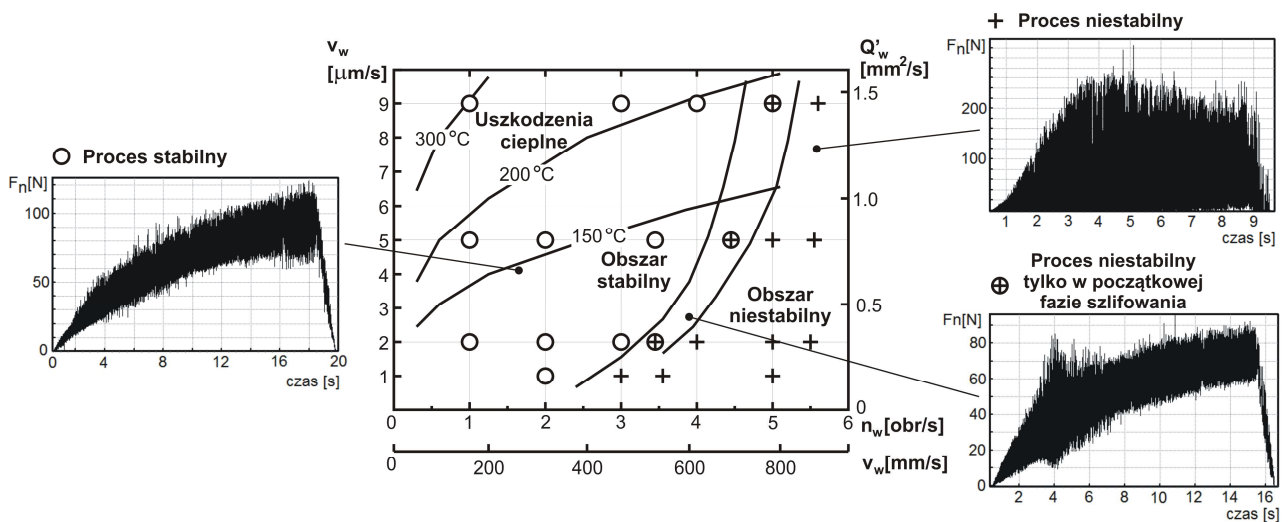
Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wynika, że istnieje ścisła zależność pomiędzy drganiami rejestrowanymi w osi X i Y, a wynikową falistością przedmiotu obrabianego i ściernicy. Ponadto uzyskano wysoką korelację pomiędzy danymi uzyskanymi podczas badań doświadczalnych a tymi uzyskanymi podczas symulacji komputerowych. Wysoki współczynnik korelacji daje podstawy do rozszerzenia uzyskanych wyników na inne przypadki technologiczne uwzględniające różne masy i podatności przedmiotu obrabianego oraz ściernicy, różne średnice przedmiotu i ściernicy, parametry zdolności skrawnej ściernicy, jak również parametry kinematyczne szlifowania, w szczególności w fazie szlifowania wykończającego i wyiskrzającego. Uzyskane wyniki stanowią zatem podstawę do budowy bazy danych umożliwiającej efektywne przewidywanie i prognozowanie wynikowej falistości przedmiotu i ściernicy oraz na wstępne projektowanie przebiegu procesu szlifowania. Przykładowe falistości ściernicy uzyskane podczas badań eksperymentalnych i symulacyjnych przedstawiono na rysunku 4. Widoczne jest duże podobieństwo pomiędzy zarysem rzeczywistym, a tym uzyskanym podczas symulacji komputerowej.

Opracowany model procesu szlifowania został również użyty do ustalenia granicy stabilnego obszaru szlifowania ze względu na drgania samowzbudne spowodowane rozwojem falistości na przedmiocie obrabianym. Ten rodzaj drgań samowzbudnych narasta najczęściej stosunkowo szybko przy zbyt wysokich prędkościach obwodowych przedmiotu [2]. Z wykorzystaniem opracowanego modelu procesu szlifowania określono granice stabilnego obszaru szlifowania dla różnych parametrów przedmiotu oraz ściernicy.



Rys. 4. Zarysy ściernicy pod koniec okresu trwałości uzyskane podczas badań doświadczalnych a) i symulacyjnych b) oraz odpowiadające amplitudy falistości dla różnych częstości występowania fal na obwodzie ściernicy
 Fig. 4. Shape of the grinding wheel at the end of wheel life obtained during experimental test a) and during simulation b) as well as corresponding waviness errors for different frequencies of waves on wheel periphery

Przykładowy wykres obszaru stabilnego dla podatnego przedmiotu wraz z obszarem uszkodzeń cieplnych przedmiotu przedstawiono na rysunku 5.

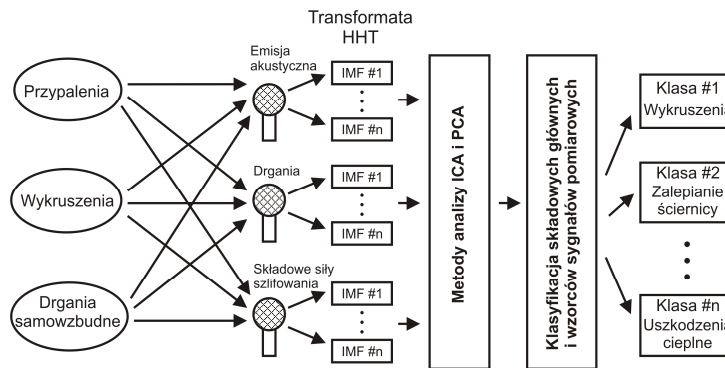


Rys. 5. Zakres strefy stabilnej w procesie szlifowania ze względu na rozwój falistości na przedmiocie obrabianym w podatnym układzie OUPN ($k_{xc} = 5 \text{ N}/\mu\text{m}$, $m_l = m_w = 2.5 \text{ kg}$, $d_w = 50\text{mm}$, $D_s = 300\text{mm}$) wraz z ograniczeniem z powodu uszkodzeń cieplnych przedmiotu

Fig. 5. Range of stable grinding conditions with respect to workpiece chatter development for the workpiece of low stiffness ($k_{xc} = 5 \text{ N}/\mu\text{m}$, $m_l = m_w = 2.5 \text{ kg}$, $d_w = 50\text{mm}$, $D_s = 300\text{mm}$) along with restriction due to the workpiece thermal damages

4. PODSYSTEM DIAGNOSTYKI DLA PROCESU SZLIFOWANIA

Strukturę inteligentnego systemu wydobywania informacji z danych pomiarowych oraz klasyfikacji stanu procesu szlifowania przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Struktura automatycznego systemu wydobywania informacji z danych pomiarowych oraz klasyfikacji stanu procesu szlifowania

Fig. 6. Structure of the automatic system for knowledge discovery from measurement data and for process state classification

Przedstawiony system wykorzystuje w pierwszej kolejności transformatę Hilberta-Huang'a (HHT) w celu wyznaczenia kolejnych nieliniowych składowych (intrinsic mode functions IMF) o malejących średnich częstotliwościach dla surowego sygnału emisji akustycznej, sygnału drgań oraz sygnałów składowych siły szlifowania [10,11,12]. Składowe te zawierają informacje o chwilowej amplitudzie sygnału oraz jego chwilowych częstotliwościach. Dzięki zastosowaniu transformaty HHT wyznaczono składowe zawierające skokowe zmiany amplitudy, pojawiające się np. podczas procesu wykruszania ziarn ściernych, jak również składowe zawierające powolne zmiany amplitudy, np. związane z rozwojem drgań samowzbudnych ściernicy lub jej zalepaniem. Dla poszczególnych składowych IMF sygnałów pomiarowych wyznaczono następnie wybrane cechy statystyczne obejmujące wartość maksymalną sygnału, wartość średnią, odchylenie standardowe, kurtozę, skośność rozkładu sygnału, itp. Cechy statystyczne wyznaczono dla danych rzeczywistego przebiegu składowych IMF, chwilowych amplitud oraz częstotliwości składowych IMF przy zastosowaniu transformaty Hilberta [10].

W następnej kolejności zastosowano metodę analizy składowych głównych oraz składowych niezależnych (principal component analysis PCA and independent component analysis ICA) w celu zredukowania wymiaru zbioru cech sygnałów bez istotnego obniżenia poziomu informacji zawartej w zredukowanym zbiorze cech [13]. W celu wyznaczenia macierzy głównych składowych utworzono podzbiory cech sygnałów dla różnych stanów procesu szlifowania obejmujących pracę w strefie uszkodzeń cieplnych przedmiotu, intensywnego wykruszania ściernicy, drgań samowzbudnych dla danych na początku i na końcu okresu trwałości ściernicy. Z wykorzystaniem metod PCA i ICA wybrano składowe IMF poszczególnych sygnałów pomiarowych oraz zbiory cech tych składowych

zawierających ponad 99% informacji o stanie procesu. Z wykorzystaniem metody PCA możliwe jest również przypisanie istotności poszczególnym cechom tworząc malejące podzbiory cech o odpowiednio wysokim poziomie zawartej w nich informacji o stanie procesu. Przykładowo dla sygnału drgań wybrano dwie składowe odpowiadające czwartej i piątej składowej IMF ($f_{IMF4} \approx 1400\text{Hz}$, $f_{IMF5} \approx 750\text{Hz}$), a dla surowego sygnału EA wybrano pierwszą i drugą składową IMF ($f_{IMF1} \approx 240\text{kHz}$, $f_{IMF2} \approx 115\text{kHz}$) [11]. W wyniku zastosowania wspomnianych metod zbiorów cech dla sygnałów drgań został zredukowany o ponad 83%, dla sygnału emisji akustycznej o ponad 40 %, a dla sygnałów składowych siły szlifowania o ponad 60%. Wybrane cechy sygnałów EA i drgań oraz poziom ich istotności według dwóch pierwszych komponentów (kolumn) macierzy składowych głównych PC_1 i PC_2 przedstawiono zbiorczo w tabeli 1 i 2.

Tabela 1. Wyselekcjonowane cechy surowego sygnału EA i ich względna istotność
Table 1. Selected features of raw acoustic emission signal AE and its relative importance

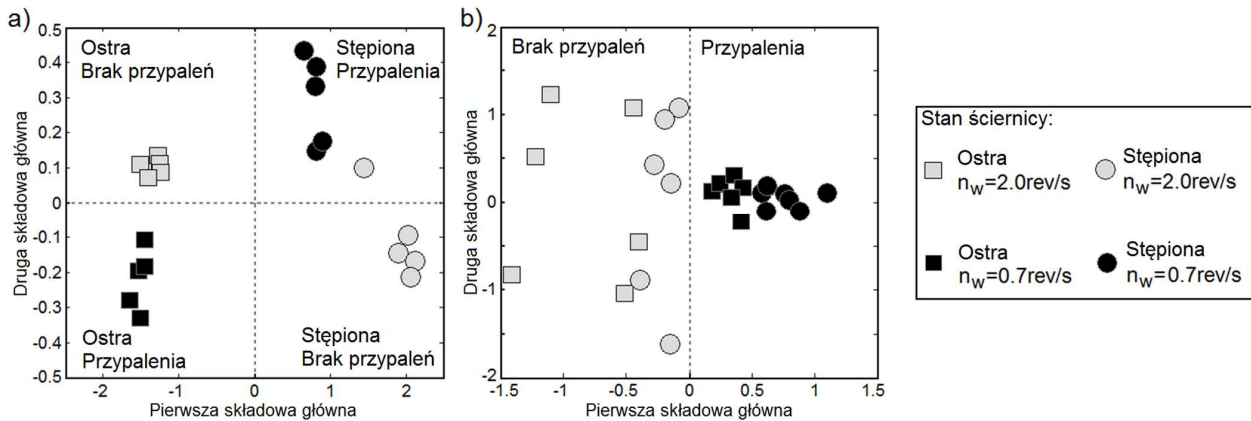
Cechy składowych IMF sygnału emisji akustycznej	Pierwsza składowa IMF ₁ EA		Druga składowa IMF ₂ EA	
	PC ₁	PC ₂	PC ₁	PC ₂
Wart. maksymalna amplitudy IMF	● 0.26	● -0.21	● 0.11	0.00
Wart. średnia amplitudy IMF	● 0.15	-0.01	● 0.22	-0.01
Wart. średnia chwilowej częstotliwości IMF	-0.02	0.00	● -0.15	0.00
Odchylenie standardowe IMF	● 0.25	-0.03	● 0.20	-0.02
Odchylenie standardowe amplitudy IMF	● 0.30	-0.05	● 0.16	-0.01
Odchylenie stand. Chwil. częstotliwości IMF	● 0.10	-0.03	● -0.13	0.03
Kurtoza IMF	● 0.11	● -0.46	● -0.33	0.04
Kurtoza amplitudy IMF	● -0.29	● -0.74	● -0.38	● 0.10
Skośność amplitudy IMF	-0.01	● -0.42	● -0.50	● 0.10

Tabela 2. Wyselekcjonowane cechy sygnału drgań i ich względna istotność
Table 2. Selected features of vibration signal and its relative importance

Cechy składowych IMF sygnału drgań	Czwarta składowa IMF ₄ sygnału drgań		Piąta składowa IMF ₅ sygnału drgań	
	PC ₁	PC ₂	PC ₁	PC ₂
Wart. maksymalna amplitudy IMF	● 0.35	0.03	● 0.37	● -0.28
Wart. średnia amplitudy IMF	● 0.32	● 0.39	● 0.39	● -0.29
Wart. średnia chwilowej częstotliwości IMF	● -0.12	● -0.61	● -0.11	● -0.52
Odchylenie standardowe IMF	● 0.32	0.07	● 0.37	● -0.17
Odchylenie standardowe amplitudy IMF	● 0.33	-0.08	● 0.34	0.05

Wyznaczone macierze składowych głównych zostały następnie użyte do klasyfikacji zbioru testowego składającego się z 24 przykładów różnych warunków szlifowania.

Wykresy rozkładu wyników klasyfikacji stanu procesu według pierwszych dwóch składowych głównych dla sygnału drgań oraz surowego sygnału emisji akustycznej przedstawiono na rysunku 7. Jak można zauważyć w przypadku sygnału drgań prawie wszystkie przypadki zostały prawidłowo odseparowane i rozpoznane. Przedstawione wyniki dają podstawę do efektywnego przewidywania stanu procesu na podstawie cech składowych sygnału drgań powstałych w wyniku użycia transformaty HHT.



Rys. 7. Wykresy wyników składowych głównych dla: a) sygnału drgań; b) surowego sygnału emisji akustycznej
Fig. 7. Principal component scatter plots for: a) vibration signal; b) raw acoustic emission signal

W przypadku surowego sygnału emisji akustycznej dwa odrębne obszary mogą być rozróżnione dla pierwszej składowej głównej. Obszary te odpowiadają pracy w strefie bez i z uszkodzeniami cieplnymi przedmiotu, rysunek 7b. Jednakże regiony skupień wyników PCA dla ostrej i zużytej ściernicy również mogą być rozróżnione. Wynika to prawdopodobnie z faktu, iż zużywanie się ściernicy i praca w strefie uszkodzeń cieplnych, przy niskiej prędkości obwodowej przedmiotu, mają podobny wpływ na zmiany charakteru sygnału emisji akustycznej (wykruszanie się ściernicy z powodu zużycia lub zbyt dużego obciążenia ziarn ściernicy i mostków spoiwa). Ponadto widoczny jest różny rozrzut wyników w dziedzinie drugiej składowej głównej sygnału EA dla poszczególnych grup danych.

Podsumowując, zużycie ściernicy jak również uszkodzenia cieplne obrabianego przedmiotu mogą być skutecznie wykrywane przez analizę dwóch pierwszych składowych głównych sygnału drgań i emisji akustycznej. Analiza wyników może odbywać się z wykorzystaniem różnych klasyfikatorów w dziedzinie składowych głównych, jak również w dziedzinie cech sygnałów pomiarowych.

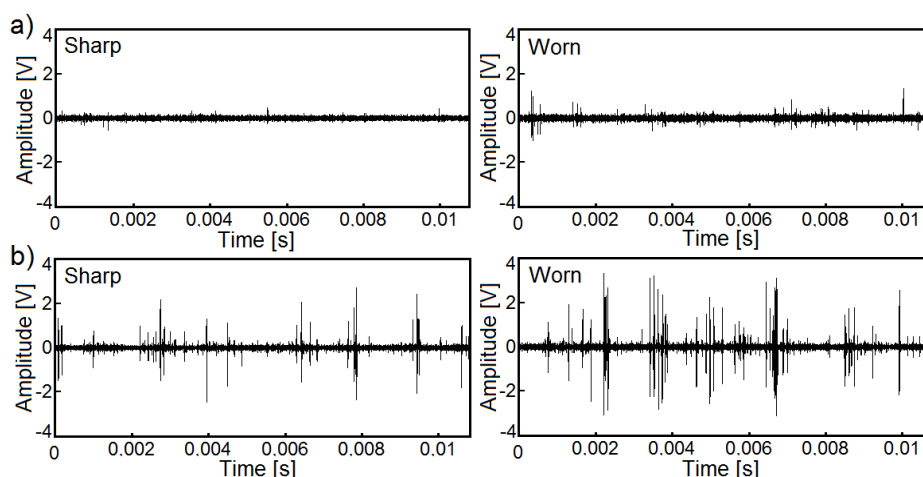
Do klasyfikacji stanów procesu szlifowania w dziedzinie składowych głównych wstępnie zastosowano metodę radialnych funkcji bazowych RBF. Wzorce uczące w dziedzinie cech sygnałów pomiarowych mogą być otrzymane w wyniku rzutowania pierwszych dwóch składowych głównych na dziedzinę cech statystycznych składowych IMF. Dzięki takiemu postępowaniu możliwe jest otrzymanie wzajemnie niezależnych wzorców uczących, które reprezentują różne stany procesu.

Do klasyfikacji stanu procesu planuje się tu użycie metod drzew decyzyjnych [14]. Dzięki zastosowaniu tych algorytmów będzie możliwe uzyskanie minimalnego zbioru reguł

diagnostycznych o stanie procesu i wynikach szlifowania. W przypadku użycia rozmytych drzew decyzyjnych możliwe jest dodatkowo strojenie funkcji przynależności zbiorów rozmytych z wykorzystaniem algorytmów propagacji wstecznej stosowanych do uczenia sieci neuronowych. Ten kierunek badań wydaje się być najbardziej obiecujący. Z przeprowadzonych wstępnych badań wynika jednak, iż różne metody klasyfikacji sprawdzają się lepiej lub gorzej podczas klasyfikacji różnych stanów procesu szlifowania. Z tych powodów podjęto wstępne prace w celu integracji różnych rodzajów klasyfikatorów lub reguł diagnostycznych z wykorzystaniem teorii ewidencji (Dempster-Shafer theory of evidence) [15]. Metoda ta stosowana jest do przybliżonego wnioskowania na podstawie informacji niepewnej i niepełnej. Należy zauważyć, iż w przeciwieństwie do innych metod, które wymagają dyskretyzacji lub binaryzacji danych pomiarowych, zaletą metod analizy składowych głównych PCA lub niezależnych ICA jest możliwość przetwarzania sygnałów ciągłych, przez co możliwa jest identyfikacja wczesnych symptomów niepożądanych stanów procesu szlifowania.

5. ANALIZA SYGNAŁU EMISJI AKUSTYCZNEJ

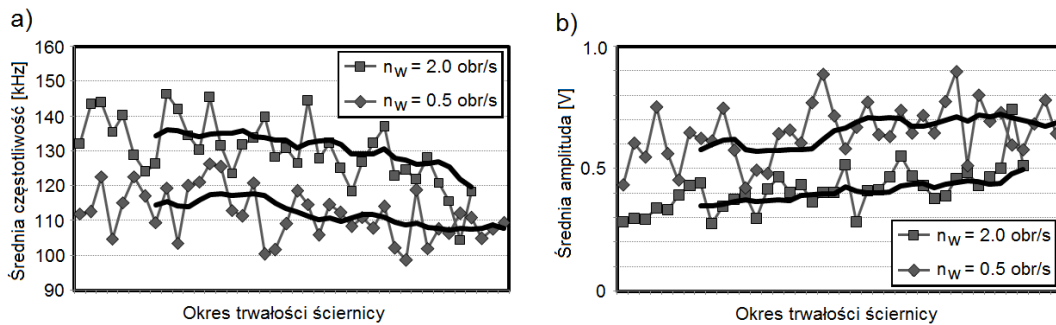
Wyniki analizy sygnałów pomiarowych z użyciem metod HHT i PCA zostały między innymi wykorzystane do ustalenia możliwości diagnozowania stanu czynnej powierzchni ściernicy CPS na podstawie wyselekcjonowanych cech surowego sygnału emisji akustycznej. Z analizy komponentów IMF surowego sygnału EA okazało się, iż pierwsza składowa IMF_1 o średniej częstotliwości wynoszącej w przybliżeniu 240kHz obrazuje zmiany zachodzące w topografii CPS związane z wykruszaniem się ściernicy z powodu jej zużycia lub zbyt dużego obciążenia cieplnego struktury ściernicy. Przebieg zmian tej składowej IMF przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Przebieg zmian pierwszej składowej IMF_1 surowego sygnału emisji akustycznej dla ostrej i stępionej ściernicy: a) wysoka prędkości obrotowa przedmiotu $n_w=2$ obr/s, b) niska prędkości obrotowa przedmiotu $n_w=0.5-0.7$ obr/s ($d_w = 90$ mm)

Fig. 8. The course of the first IMF_1 component of acoustic emission signal for sharp and worn grinding wheel: a) high workpiece rotational speed $n_w=2$ rev/s, b) low workpiece rotational speed $n_w=0.7$ rev/s

Do takiego wniosku skłania również fakt, iż średnia częstotliwość tej składowej była niezmienna w okresie trwałości ściernicy, jak również dla niskich i wysokich prędkości obwodowych przedmiotu. Z kolei druga składowa IMF_2 sygnału EA obrazuje głównie procesy skrawania i tarcia ziarn ściernych. Na rysunku 9 przedstawiono zmiany średniej częstotliwości i średniej amplitudy tej składowej dla niskich i wysokich prędkości obwodowych przedmiotu.



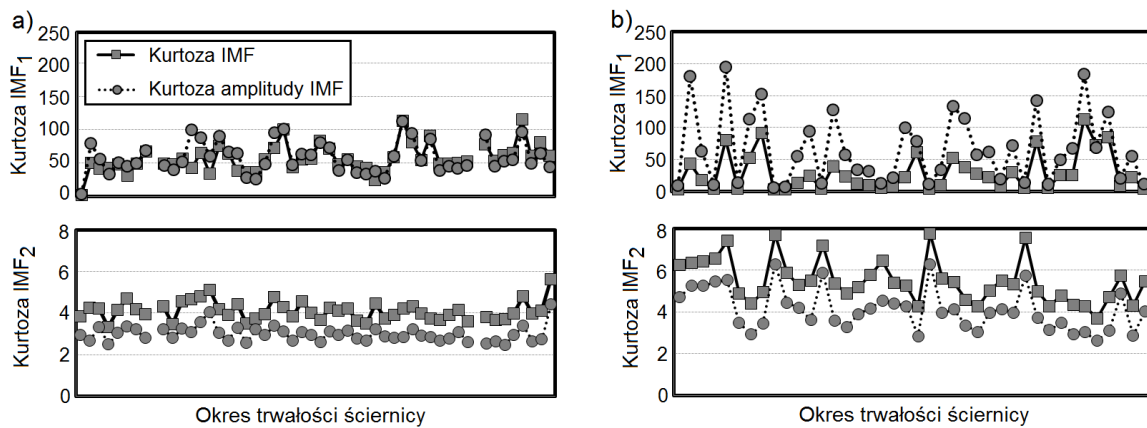
Rys. 9. Zmiany częstotliwości a) i amplitudy b) drugiej składowej IMF_2 surowego sygnału emisji akustycznej dla niskiej i wysokiej prędkości obwodowej przedmiotu

Fig. 9. Changes of mean frequency a) and mean amplitude of the second IMF_2 component of AE signal for low and high workpiece peripheral speed

Z przedstawionych wykresów wynika, iż średnia częstotliwość maleje, a średnia amplituda rośnie wraz ze zużywaniem się ściernicy, szczególnie w końcowym okresie trwałości ściernicy. Wstępnie przyjęto hipotezę, iż taki charakter zmian tej składowej jest spowodowany malejącą liczbą kinematycznych (skutecznych) ziarn ściernych w wyniku wykruszania się dużych fragmentów bądź całych ziarn ściernych [13] co powinno mieć odzwierciedlenie w zmianie topografii CPS. Ponadto na rysunku 9 widać, że średnia częstotliwość tej składowej IMF jest znacząco mniejsza, a średnia amplituda większa dla niskich prędkości obwodowych przedmiotu, co sugeruje, że kinematyczna liczba ziarn maleje wraz ze zmniejszaniem się prędkości obwodowej przedmiotu.

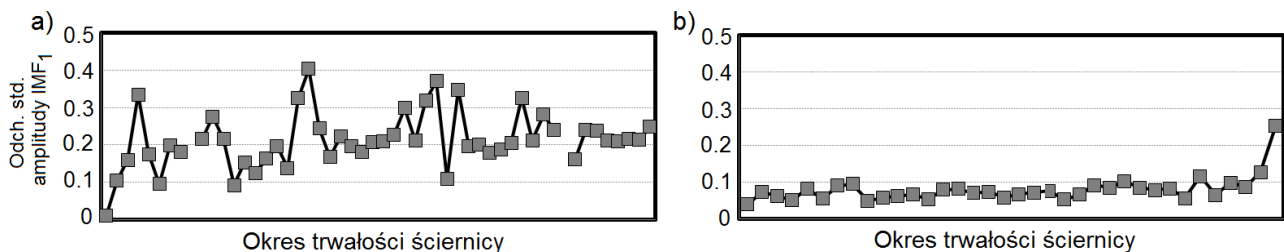
Na rysunku 10 i 11 przedstawiono zmiany innych cech statystycznych sygnału EA, tj. kurtozy i odchylenia standardowego tego sygnału.

Wysokie wartości kurtozy dla wysokiej prędkości obwodowej przedmiotu świadczą o większym skupieniu sygnału EA wokół wartości średniej. Natomiast dla niskich prędkości obwodowych przedmiotu wartość kurtozy jest mniejsza, a jej przebieg w czasie wyraźnie spłaszczony, co świadczy o dużym rozrzucie wartości sygnału EA wokół wartości średniej spowodowanym wykruszaniem się ściernicy z powodu zbyt dużego obciążenia cieplnego ziarn ściernych lub uszkodzeniami cieplnymi przedmiotu. Ponadto w przypadku analizy kurtozy należałoby również analizować jej przebieg w czasie. Mała wariancja przebiegu kurtozy świadczy o intensywnym wykruszaniu się ściernicy, natomiast wysoka o braku wykruszania lub zalepianiu się ściernicy. Podobny charakter zmian sygnału EA można również zaobserwować na rysunku 11 przedstawiającym zmiany odchylenia standardowego sygnału EA w okresie trwałości ściernicy.



Rys. 10. Przebieg zmian kurtozy w okresie trwałości ściernicy dla: a) niskiej prędkości obrotowej przedmiotu $n_w=0.5-0.7$ obr/s; b) wysokiej prędkości obrotowej przedmiotu $n_w=2$ obr/s

Fig. 10. The course of kurtosis of AE signal for the first and second IMF component during the grinding wheel life for: a) low workpiece rotational speed $n_w=0.5-0.7$ rev/s; b) high workpiece rotational speed $n_w=2$ rev/s



Rys. 11. Zmiany odchylenia standardowego amplitudy pierwszej składowej IMF_1 sygnału EA dla: a) niskiej prędkości obrotowej przedmiotu $n_w=0.5-0.7$ obr/s; b) wysokiej prędkości obrotowej przedmiotu $n_w=2$ obr/s

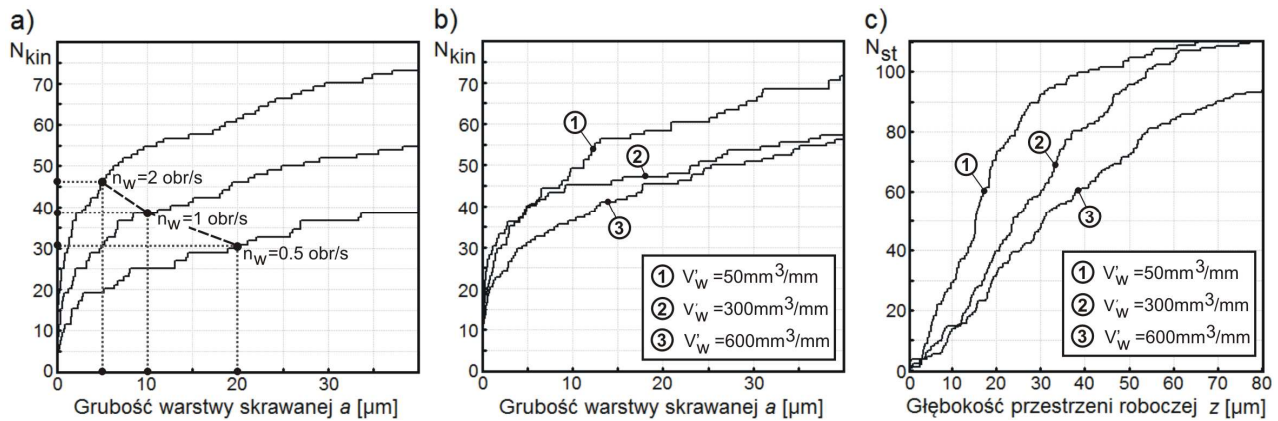
Fig. 11. Changes of standard deviation of first IMF_1 component amplitude of AE signal for: a) low workpiece rotational speed $n_w=0.5-0.7$ rev/s; b) high workpiece rotational speed $n_w=2$ rev/s

Aby wykazać słuszność postawionej tezy o malejącej liczbie kinematycznych ziarn ściernych wraz ze zużywaniem się ściernicy i zmniejszaniem się prędkości obwodowej przedmiotu przeprowadzono pomiary mikrogeometrii CPS. Do tego celu wykorzystano profilograf przymocowany do uchwytu imadła celem dosuwania go do ściernicy [16]. Ponadto opracowano oprogramowanie kontrolno-pomiarowe do akwizycji danych zarysu ściernicy obejmujące również, wstępną filtrację rejestrowanego sygnału. Powolne obroty ściernicy uzyskano poprzez obracanie szlifowanego wałka dociskanego do ściernicy za pośrednictwem gumowego pierścienia. W celu wyznaczenia statycznej i kinematycznej (skutecznej) liczby ziarn ściernych skorzystano ze wzoru określającego maksymalną różnicę pomiędzy następującymi po sobie wierzchołkami wzniesień zarysu CPS, przy której następujące ziarno nie wchodzi w kontakt z materiałem obrabianym [17]:

$$h_{\max} = \frac{2L_Z v_p}{v_s} \sqrt{\frac{a_e}{D_{eq}}} \quad (2)$$

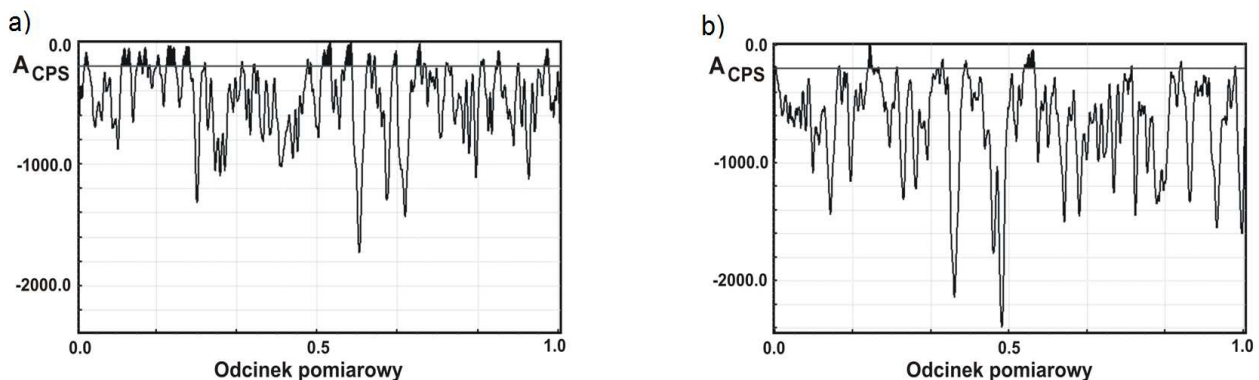
gdzie: L_Z – odległość pomiędzy wierzchołkami wzniesień CPS, v_p , v_s – prędkości obwodowe przedmiotu i ściernicy, a_e – grubość warstwy szlifowanej, D_{eq} – równoważna średnica ściernicy.

Na rysunku 12 przedstawiono zmiany kinematycznej (skutecznej) i statycznej liczby ziarn ściernych dla znormalizowanej długości pomiarowej zarysu CPS dla różnych prędkości obwodowych przedmiotu i stanu ściernicy. Jak widać kinematyczna liczba ostrzy maleje wraz ze zmniejszaniem się prędkości obwodowej przedmiotu i zużyciem ściernicy.



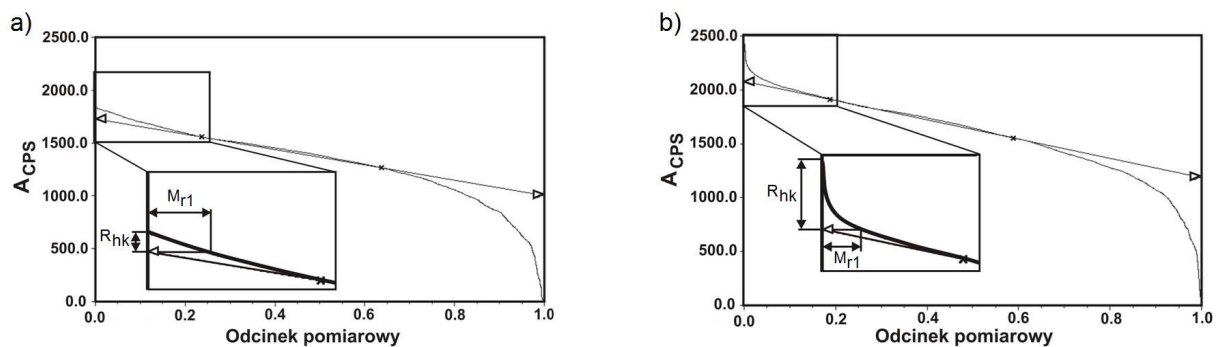
Rys. 12. Zmiany kinematycznej N_{kin} i statycznej N_{st} liczby ziarn ściernych dla: a) różnych prędkości obrotowych przedmiotu ($v_f=const$); b) i c) różnego ubytku materiału obrabianego w okresie trwałości ściernicy
 Fig. 12. Changes of kinematic N_{kin} and static N_{st} number of abrasive grains for : a) different workpiece rotational speeds ($v_f=const$); b) and c) different specific material removal during the grinding wheel life

Do wyznaczenia miary zużycia czynnej powierzchni ściernicy wykorzystano również metodę analizy udziału nośnego profilu mikrogeometrii CPS. W tym celu opracowano program do wyznaczania krzywej Abbott'a zarysu CPS oraz parametrów tej krzywej zgodnie z odpowiednią normą. Dla zarejestrowanych profili ściernicy zostały wyznaczone krzywe Abbott'a, parametry wysokościowe i udziały nośne wzniesień, rdzenia i wgłębień zarysu CPS. Typowe wycinki profilu CPS dla ostrej i zużytej ściernicy przedstawiono na rysunku 13. Jak widać na rysunku 13b dla ściernicy stępionej znacząco maleje liczba statycznych ziarn ściernych.



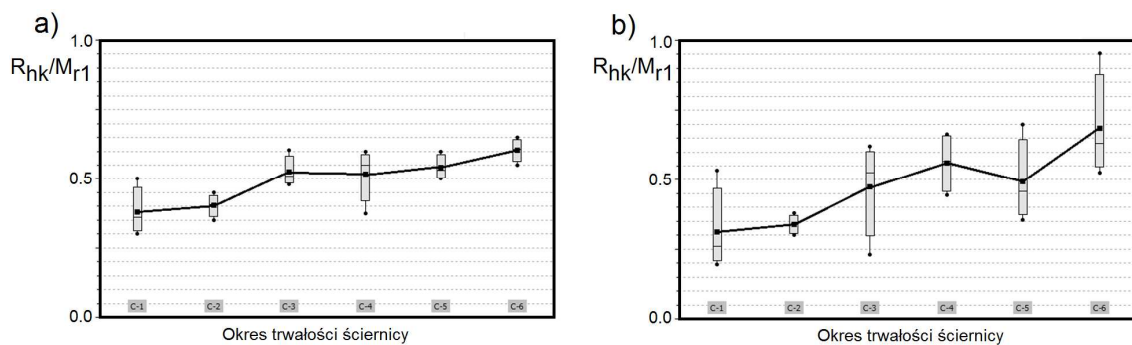
Rys. 13. Zarejestrowane odcinki pomiarowe profilu mikrogeometrii CPS dla: a) ostrej i b) stępionej ściernicy
 Fig. 13. Profiles of microgeometry of a grinding wheel for: a) sharp and b) worn grinding wheel

Z kolei na rysunku 14 przedstawiono typowe przebiegi krzywej Abbott'a dla ściernicy ostrej i stępionej. W wyniku analizy zarejestrowanych profili CPS ściernicy i odpowiadających im krzywych Abbott'a stwierdzono, że parametrem który dobrze charakteryzuje zmianę liczby aktywnych ziaren ściernych jest stosunek wysokości wierzchołków R_{hk} do udziału nośnego wierzchołków M_{r1} . Charakter zmian tego parametru dla ostrej i stępionej ściernicy przedstawiono na rysunku 14. Dla zużytej ściernicy parametr ten znacząco wzrasta z powodu malejącej liczby aktywnych ziaren ściernych i w efekcie wzrostu objętości usuwanego materiału przypadającego na pojedyncze ziarno ściernic.



Rys. 14. Typowe przebiegi krzywej udziału nośnego profilu ściernicy dla: a) ostrej i b) stępionej ściernicy
Fig. 14. A typical shapes of bearing fraction curve of grinding wheel profile for: a) sharp and b) worn grinding wheel

Charakterystyczne zmiany tego parametru dla przykładowych warunków szlifowania przedstawiono na rysunku 15. Jak widać parametr ten znacząco wzrasta w miarę zużywania się ściernicy.

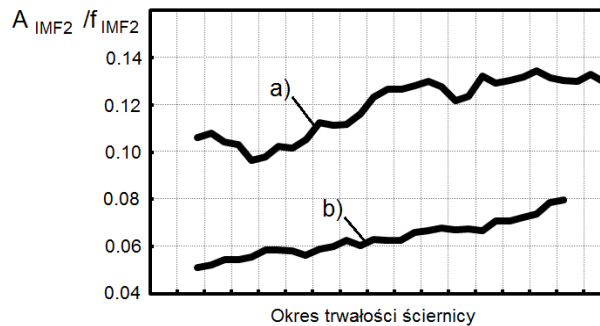


Rys. 15. Przykładowe zmiany parametru R_{hk}/M_{r1} dla różnych warunków szlifowania w okresie trwałości ściernicy, $v_f = 6 \mu\text{m/s}$; a) $n_w = 2 \text{ obr/s}$; b) $n_w = 0.32 \text{ obr/s}$; ($d_w \approx 100 \text{ mm}$; $b_w = 26 \text{ mm}$)

Fig. 15. Exemplified changes of parameter R_{hk}/M_{r1} for different grinding conditions during the wheel life, $v_f = 6 \mu\text{m/s}$; a) $n_w = 2 \text{ rev/s}$; b) $n_w = 0.32 \text{ rev/s}$; ($d_w \approx 100 \text{ mm}$; $b_w = 26 \text{ mm}$)

W wyniku przeprowadzonej analizy ustalono, że parametrem który dobrze charakteryzuje zmiany mikrogeometrii CPS oraz stan procesu jest stosunek średniej amplitudy drugiej składowej IMF_2 do jej średniej częstotliwości. Rysunek 16 przedstawia

charakter zmian tego parametru dla pracy przy wysokich oraz niskich prędkościach obwodowych przedmiotu, przy których występują przypalenia przedmiotu i pogorszenie parametrów stanu warstwy wierzchniej przedmiotów obrabianych.



Rys. 16. Zmiany parametru A_{IMF2}/f_{IMF2} sygnału EA dla: a) niskiej i b) wysokiej prędkości obwodowej przedmiotu
Fig. 16. Changes of A_{IMF2}/f_{IMF2} parameter for acoustic emission signal for: a) low and b) high workpiece peripheral speed

Przedstawione wyniki badań wybranych cech sygnału emisji akustycznej dają podstawę do pośredniej oceny stanu czynnej powierzchni ściernicy i w efekcie do przewidywania parametrów stanu warstwy wierzchniej obrabianych przedmiotów, np. chropowatości przedmiotu.

6. PROPOZYCJE DALSZYCH PRAC I WNIOSKI

W wyniku analizy statystycznej cech amplitudowych i częstotliwościowych składowych IMF sygnałów drgań i emisji akustycznej możliwe jest wczesne diagnozowanie symptomów zużycia ściernicy, rozwoju drgań samowzbudnych i innych niepożądanych stanów procesu, takich jak wykruszenia ściernicy czy przypalenia powierzchni obrabianej przedmiotu obrabianego. Dalsze prace obejmować będą realizację tzw. minimalnego kondycjonowania ściernicy w celu likwidacji powoli narastającej falistości ściernicy i ciągłego odnawiania właściwego stanu mikrogeometrii CPS w sprzężeniu zwrotnym od parametrów sygnału emisji akustycznej.

Estymacja amplitudy falistości ściernicy oraz przedmiotu może być z powodzeniem wykonywana przez prostą sieć neuronową lub bazę danych głównie na podstawie analizy składowych sygnału drgań. Dane mogą być pozyskiwane na podstawie prowadzonych prób szlifowania lub z wykorzystaniem opracowanego modelu procesu szlifowania. Dzięki wysokiej korelacji pomiędzy danymi eksperymentalnymi a modelem symulacyjnym, możliwe będzie rozszerzenie uzyskanych wyników na pełen zakres przypadków technologicznych, uwzględniających różne parametry przedmiotu obrabianego i ściernicy oraz przebieg procesu szlifowania. Dzięki opracowanemu modelowi symulacyjnemu procesu szlifowania możliwe jest również przewidywanie strefy niestabilnej ze względu na rozwój falistości na przedmiocie. Możliwe jest zatem wiarygodne projektowanie wstępnego

przebiegu procesu szlifowania w kolejnych fazach cyklu. Ponadto, w wyniku przeprowadzonych analiz ustalono, że stan procesu szlifowania powinien być ustalany zarówno przez analizę sygnałów w dziedzinie cech statystycznych tych sygnałów, jak również poprzez analizę statystyczną zmian tych cech w dziedzinie czasu. Jedną z interesujących metod, która umożliwia takie postępowanie jest metoda modelowania procesów decyzyjnych z wykorzystaniem sieci Petriego. Do ustalenia wstępnej struktury sieci Petriego zostaną użyte metody indukcji drzew decyzyjnych. Taka struktura systemu diagnostyki pozwoli na analizę wolnozmiennych cech sygnałów pomiarowych, jak również szybkozmiennych związanych przykładowo z wykuszaniem się ściernicy lub rozwojem drgań samowzbudnych obrabianego przedmiotu.

Autorzy artykułu są wdzięczni Europejskiemu Funduszowi Rozwoju Regionalnego (Projekt Nr POIG.0101.02-00-015/08) oraz Ministerstwu Nauki i Szkolnictwa Wyższego (Projekt KBN Nr NN503 217938) za wsparcie finansowe.

LITERATURA

- [1] SNOYS R., BROWN D., 1969, *Dominating parameters in grinding wheel and workpiece regenerative chatter*, Proc. of the 10th International Machine Tool Design and Research Conference, Manchester, 325-348.
- [2] INASAKI I., KARPUSZEWSKI B., LEE H.-S., 2001, *Grinding chatter – origin and suppression*, Annals of the CIRP, 50/2.
- [3] ALTINTAS Y., WECK M., 2004, *Chatter stability of metal cutting and grinding*, Annals of the CIRP, 53/2.
- [4] WECK M., HENNES N., SCHULZ A., 2001, *Dynamic behaviour of cylindrical traverse grinding processes*, Annals of the CIRP, 50/1.
- [5] LAJMERT P., 2003, *Wykorzystanie metod sztucznej inteligencji do sterowania i optymalizacji procesu szlifowania wzdłużnego wałków*, Praca doktorska-Politechnika Łódzka, Promotor Prof. Bogdan Kruszyński.
- [6] WRĄBEL D., TEODORCZYK J., LAJMERT P. i inni, 2000, *Sterowany numerycznie napęd ruchów posuwowych w szlifierkach*, Projekt celowy KBN – sprawozdanie.
- [7] LEWANDOWSKI D., 2002, *Ciśnieniowy pomiar obciążeń*, Napędy i Sterowanie Hydrauliczne, Wrocław.
- [8] LAJMERT P., KRUSZYŃSKI B., WRĄBEL D., 2008, *An intelligent supervision system for optimization and control of cylindrical grinding processes*, XXXI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Bochnia.
- [9] KRUSZYŃSKI B., LAJMERT P., 2005, *An intelligent supervision system for cylindrical traverse grinding*, Annals of the CIRP, 54/1.
- [10] HUANG N., ET AL., 1998, *The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis*. Proc. Roy. Soc. Lond.
- [11] LAJMERT P., KRUSZYŃSKI B., 2010, *A diagnostic system for cylindrical plunge grinding process based on Hilbert-Huang transform and principal component analysis*, Proceedings of the 5th International Conference on Advances in Production Engineering, Warszawa, 117-126.
- [12] LAJMERT P., KRUSZYŃSKI B., WRĄBEL D., 2009, *An intelligent sensor based supervision system for cylindrical grinding processes*, Journal of Machine Engineering, 9/1/113-120.
- [13] LAJMERT P., 2010, *An application of Hilbert-Huang transform and principal component analysis for diagnostics of cylindrical plunge grinding process*, Journal of Machine Engineering, 10/1/39-49.
- [14] YUAN Y., SHAW M. J., 1995, *Induction of fuzzy decision trees*, Fuzzy Sets and Systems 69/125-139.
- [15] SHAFER G., *A mathematical theory of evidence*, Princeton University Press.
- [16] LEŻAŃSKI P., LAJMERT P. i inni, 2006, *Hybrydowy system sztucznej inteligencji do optymalizacji warunków szlifowania kłowego wałków*, Projekt badawczy KBN - sprawozdanie.
- [17] OCZOŚ K., PORZYCKI J., 1986, *Szlifowanie – Podstawy i technika*, WNT, Warszawa.

IDENTIFICATION OF EARLY SYMPTOMS OF UNDESIRED PROCESS STATES
IN CYLINDRICAL PLUNGE GRINDING

In the paper a reliable tool wear and part quality identification system for cylindrical plunge grinding process has been presented. A model of process dynamics has been created taking into account waviness development on the workpiece and on grinding wheel. This model was used to predict stable grinding conditions with respect to workpiece chatter development. Next with the use of empirical mode decomposition method a set of features of vibration and acoustic emission signal was created. To estimate the significance of the individual features a principal component analysis was used. Different methods have been analyzed to establish diagnostic decision rules and to model the decision process about the process state.