

Politechnika Łódzka

ZESZYTY NAUKOWE Nr 1120

PAWEŁ LEŻAŃSKI

AUTOMATYCZNE NADZOROWANIE PROCESU SZLIFOWANIA WGLĘBNEGO KŁOWEGO

ŁÓDŹ 2012

POLITECHNIKA ŁÓDZKA

ZESZYTY NAUKOWE Nr 1120

ROZPRAWY NAUKOWE, Z. 427

PAWEŁ LEŻAŃSKI

AUTOMATYCZNE NADZOROWANIE PROCESU
SZLIFOWANIA WGLĘBNEGO KŁOWEGO

ŁÓDŹ 2012

ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ
SCIENTIFIC BULLETIN OF THE LODZ UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY
BULLETIN SCIENTIFIQUE
DE L'UNIVERSITÉ POLYTECHNIQUE DE LODZ
НАУЧНЫЕ ЗАПИСКИ
ЛОДЗИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
WISSENSCHAFTLICHE HEFTE
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT IN LODZ

Redaktor Działu: **prof. dr hab. inż. Piotr Wodziński**

Recenzenci: **prof. dr inż. Leszek Kwapisz**
prof. dr hab. inż. Krzysztof Jemielniak

© Copyright by Politechnika Łódzka 2012

Adres Redakcji – Адрес Редакции – Editor's Office
Adresse de Redaction – Schriftleitungsadresse:

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ
90-924 Łódź, ul. Wólczańska 223
tel./fax 42-684-07-93
e-mail: zamowienia@info.p.lodz.pl
www.wydawnictwa.p.lodz.pl

ISSN 0137-4834

Nakład 140 egz. Ark. druk. 9,0. Papier offset. 80 g, 70 x 100
Druk ukończono w lipcu 2012 r.
Wykonano w Drukarni Offsetowej Quick-Druk, 90-562 Łódź, ul. Łąkowa 11

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE	5
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW	7
1. WPROWADZENIE – CEL I ZAKRES PRACY	9
2. SYSTEMY AUTOMATYCZNEGO NADZOROWANIA PROCESÓW SZLIFOWANIA	12
2.1. Automatyczne nadzorowanie procesów obróbkowych	12
2.2. Proces szlifowania jako obiekt nadzorowania	14
2.3. Monitorowanie procesu szlifowania	16
2.3.1. Ogólna charakterystyka układów monitorowania	16
2.3.2. Pomiary mocy oraz składowych siły szlifowania	21
2.3.3. Pomiary drgań	24
2.3.4. Pomiary emisji akustycznej	26
2.3.5. Ściernice zintegrowane z przetwornikami pomiarowymi oraz inne metody pomiarowe.....	30
2.4. Metody modelowania i klasyfikacji stanu procesu	31
2.5. Idea inteligentnego systemu nadzorowania.....	39
3. TEORETYCZNO-DOŚWIADCZALNE PODSTAWY AUTOMATYCZNEGO NADZOROWANIA PROCESU SZLIFOWANIA	43
3.1. Obszar akceptowalnego przebiegu procesu szlifowania.....	43
3.2. Znaczenie stanu zużycia ściernicy.....	44
3.2.1. Makrozużycie ściernicy.....	45
3.2.2. Mikrozużycie ściernicy.....	45
3.3. Znaczenie zjawisk dynamicznych.....	52
3.4. Nadzorowanie zjawisk cieplnych.....	61
3.5. Nadzorowanie chropowatości powierzchni przedmiotu szlifowanego.....	65
3.6. Podsumowanie analizy uwarunkowań automatycznego nadzorowania szlifowania wgłębnego kłowego.....	67
4. BADANIA DOŚWIADCZALNE	71
4.1. Stanowisko badawcze.....	71
4.2. Cel, warunki i zakres badań doświadczalnych.....	75
4.3. Bezpośrednie miary stanu czynnej powierzchni ściernicy.....	77
4.4. Bezpośrednie miary stanu jakości przedmiotu szlifowanego.....	81
4.5. Nadzorowanie makrogeometrii CPS.....	82
4.5.1. Wykorzystanie DFT do analizy sygnału drgań.....	83
4.5.2. Wykorzystanie transformaty falkowej do analizy sygnału drgań i EA.....	86
4.5.3. Korelacja wybranych miar stanu makrogeometrii CPS z jej falistością.....	93

4.6. Nadzorowanie mikrogeometrii CPS.....	94
4.6.1. Wykorzystanie pomiaru składowych siły szlifowania.....	94
4.6.2. Wykorzystanie pomiaru emisji akustycznej.....	97
4.7. Nadzorowanie uszkodzeń cieplnych.....	101
4.8. Nadzorowanie chropowatości powierzchni szlifowanej.....	102
4.9. Podsumowanie doświadczalnej oceny miar stanu procesu.....	104
5. AUTOMATYCZNE NADZOROWANIE PROCESU SZLIFOWANIA WGLĘBNEGO KŁOWEGO JAKO WIELOKRYTERIALNY PROBLEM DECYZYJNY.....	106
5.1. Strategia nadzorowania procesu szlifowania wglębnego kłowego...	106
5.2. Teoria zbiorów przybliżonych rozszerzona o relację dominacji.....	109
5.2.1. Pojęcia podstawowe zbiorów przybliżonych.....	109
5.2.2. Tablice decyzyjne jako forma reprezentacji danych.....	110
5.2.3. Klasyfikowanie za pomocą reguł decyzyjnych.....	112
5.2.4. Redukcja atrybutów.....	114
5.2.5. Rozszerzenie teorii zbiorów przybliżonych o relację dominacji.....	115
5.2.6. Klasyfikowanie nowych przypadków.....	117
5.3. Tablica decyzyjna dla procesu szlifowania wglębnego kłowego.....	118
5.4. Klasyfikacja stanu procesu szlifowania wglębnego kłowego.....	125
5.4.1. Wyniki klasyfikacji dla formy zużywania się ściernicy.....	127
5.4.2. Wyniki klasyfikacji dla makrogeometrii CPS.....	130
5.4.3. Wyniki klasyfikacji dla mikrogeometrii CPS.....	132
5.4.4. Wyniki klasyfikacji dla uszkodzeń cieplnych WW przedmiotu.....	134
5.4.5. Wyniki klasyfikacji chropowatości powierzchni szlifowanej	137
5.5. Podsumowanie zastosowania teorii zbiorów przybliżonych do klasyfikacji stanu procesu szlifowania wglębnego kłowego.....	139
6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	143
BIBLIOGRAFIA.....	146
CHARAKTERYSTYKA ZAWODOWA AUTORA.....	160
ABSTRACT.....	162

STRESZCZENIE

W pracy przeprowadzono teoretyczno-doświadczalną analizę procesu szlifowania węgelnego kłowego jako obiektu nadzorowania celem opracowania ogólnych zasad i wytycznych dla automatycznego inteligentnego nadzorowania tego procesu.

Zostały przeprowadzone rozważania w trzech podstawowych grupach zagadnień. Po pierwsze przeanalizowano teoretyczno-doświadczalne podstawy nadzorowania procesu szlifowania węgelnego kłowego. Następnie doświadczalnie sprawdzono przydatność wybranych miar wielkości procesowych do pełnienia funkcji symptomów określonych stanów i wyników procesu. Trzecia grupa zagadnień związana jest z budową modelu procesu i wykorzystania go do klasyfikacji stanu procesu.

Ustalono, że podstawą prowadzenia nadzorowania procesu powinien być tzw. zalecany obszar szlifowania. Określa on parametry procesu i jakości przedmiotu szlifowanego, które powinny być objęte nadzorowaniem. Zaliczono do nich: makro- i mikrozużycie CPS, drgania samowzbudne, uszkodzenia cieplne WW przedmiotu szlifowanego oraz chropowatość powierzchni szlifowanej. Przeprowadzona analiza zjawisk i procesów powiązanych z tymi wielkościami pozwoliła ustalić warunki zrealizowania automatycznego nadzorowania procesu dotyczące układów monitorowania i zastosowania metod identyfikacji stanu i wyników procesu.

Badania doświadczalne¹ objęły pomiary bezpośrednich miar stanu CPS i jakości przedmiotu szlifowanego oraz miar wielkości procesowych wyznaczonych do nadzorowania. Jako przydatny do nadzorowania makrogeometrii CPS uznano sygnał drgań lub sygnał wartości skutecznej EA. Przy nadzorowaniu mikrogeometrii CPS i chropowatości należy wziąć pod uwagę siłę szlifowania i sygnał EA. Natomiast do nadzorowania uszkodzeń cieplnych WW przedmiotu szlifowanego wystarczająca jest znajomość wartości wskaźnika B_p . W celu uzyskania symptomów stanu procesu konieczne jest zastosowanie metod przetwarzania sygnałów, takich jak transformaty Fouriera, transformaty falkowa lub wyznaczanie miar statystycznych.

Wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych wykorzystano do budowy klasyfikatora stanu procesu w oparciu o zastosowanie teorii zbiorów przy-

¹ Badania doświadczalne wykonano na stanowisku będącym efektem kolejnych projektów badawczych w zakresie automatyzacji procesu szlifowania prowadzonych w Instytucie Obrabiarek i TBM PŁ od 1986 roku. W budowie tego stanowiska, oprócz autora tej pracy, brały udział następujące osoby: prof. F. Oryński, prof. J. Rafałowicz, prof. D. Lewandowski, dr P. Lajmert, dr A. Ornaś, dr J. Teodorczyk, dr D. Wrąbel i inni. Autor tej pracy wyraża tą drogą podziękowanie wszystkim tym osobom za ich wkład pracy. Szczególne podziękowania należą się dr. P. Lajmertowi, który wykonał oprogramowanie sterująco-pomiarowe tego stanowiska. Również Jemu i dr. D. Wrąbelowi autor dziękuje za pomoc w przeprowadzeniu doświadczeń.

bliżonych rozszerzonej o relację dominacji². Otrzymane w wyniku przeprowadzonej klasyfikacji regułowe modele procesu umożliwiają dokonywanie skutecznej oceny jego stanu na podstawie wielu miar uzyskiwanych z różnych sygnałów pomiarowych. Stanowią one gotową regułową bazę wiedzy o procesie szlifowania węgelnego kłowego, która może być podstawą systemu eksperckiego tego procesu służącego do oceny i diagnostyki jego nowych realizacji, a także do ustalania wartości wybranych wielkości procesowych w celu osiągnięcia założonych wyników procesu.

² Wszystkie obliczenia związane z indukcją reguł decyzyjnych oraz analizę i weryfikację reguł przeprowadzono za pomocą programu jMAF opracowanego przez zespół prof. Romana Słowińskiego z Politechniki Poznańskiej. Program ten jest udostępniony przez jego twórców w Internecie pod adresem <http://www.cs.put.poznan.pl/jblaszczynski/Site/jRS.html>. Obliczenia za pomocą tego programu zostały wykonane przy współpracy z mgr Marią Piłacińską, doktorantką w Zakładzie Zarządzania Produkcją Politechniki Poznańskiej.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

b	[mm]	– szerokość szlifowania
B_p	[W s/mm ²]	– wskaźnik gęstości strumienia ciepła oddziałującego na przedmiot szlifowany podczas jego kontaktu ze ściernicą
D_{eq}	[mm]	– równoważna średnica ściernicy
d_s	[mm]	– średnica ściernicy
d_w	[mm]	– średnica przedmiotu szlifowanego
F_n	[N]	– składowa normalna siły szlifowania
f_s	[Hz]	– częstotliwość progowa dla ściernicy, powyżej której następuje ścinanie wierzchołków fal powstałych na ściernicy
F_t	[N]	– składowa styczna siły szlifowania
f_w	[Hz]	– częstotliwość progowa dla przedmiotu, powyżej której następuje ścinanie wierzchołków fal powstałych na przedmiocie
G_m	[-]	– bezwymiarowa podatność dynamiczna
h_{eq}	[mm]	– równoważna grubość wióra
I_s	[-]	– współczynnik interferencji geometrycznej fal na ściernicy
I_w	[-]	– współczynnik interferencji geometrycznej fal na przedmiocie
K	[N/μm]	– sztywność strefy styku ściernicy z przedmiotem
k_I	[N/mm mm]	– właściwy opór skrawania
k_m	[N/μm]	– współczynnik sztywności statycznej układu OUPN
k_s	[N/μm]	– opór zużycia ściernicy
k_w	[N/μm]	– sztywność szlifowania
K_z	[mm ³ /N s]	– współczynnik zdolności skrawnej ściernicy
l	[-]	– współczynnik poziomu spójności dolnego przybliżenia zbioru w VC-DRSA
l_e	[mm]	– rzeczywista długość styku ściernicy z przedmiotem obrabianym
N_{ch}	[-]	– chwilowo skuteczna liczba ziaren CPS
P_c''	[W/mm ²]	– strumień mocy szlifowania (właściwa moc szlifowania)
q	[-]	– stosunek prędkości obwodowej ściernicy do prędkości obwodowej przedmiotu
Q'_w	[mm ³ /mm s]	– właściwa wydajność objętościowa szlifowania
Q_{max}	[mm ²]	– maksymalny przekrój wióra
T_s	[s]	– okres obrotu ściernicy
T_w	[s]	– okres obrotu przedmiotu
V'_w	[mm ³ /mm]	– właściwy ubytek materiału obrabianego

v_s	[m/s]	– prędkość obwodowa ściernicy
v_w	[m/s]	– prędkość obwodowa przedmiotu szlifowanego
$\overline{X}$	[-]	– górne przybliżenie zbioru
$\underline{X}$	[-]	– dolne przybliżenie zbioru
μ	[-]	– współczynnik tarcia pomiędzy powierzchnią starcia ostrza a materiałem obrabianym; stosunek składowej stycznej do składowej normalnej siły szlifowania

CPS	– czynna powierzchnia ściernicy
CWT	– ciągła transformata falkowa (ang. continuous wavelet transform – CWT)
FFT	– szybka transformata Fouriera (ang. Fast Fourier Transform – DFT)
DRSA	– teoria zbiorów przybliżonych rozszerzona o relację dominacji (ang. Dominance-Based Rough Set Approach – DRSA)
DWT	– dyskretna transformata falkowa (ang.: discrete wavelet transform – DWT)
EA	– emisja akustyczna
EA_{RMS}	– wartość skuteczna emisji akustycznej
KUM	– krzywa udziału materiałowego
OUPN	– układ Obrabiarka – Uchwyt – Przedmiot – Narzędzie
TK	– trafność klasyfikacji
VC-DRSA	– DRSA ze współczynnikiem poziomu spójności l
WPA	– pakietowa analiza falkowa (ang. wavelet packet analysis – WPA)
WWW	– właściwości warstwy wierzchniej przedmiotu szlifowanego

1. WPROWADZENIE – CEL I ZAKRES PRACY

Z punktu widzenia realizacji automatycznych systemów nadzorowania procesów szlifowania, zagadnienie diagnostyki stanu procesu nie zostało dotychczas wyczerpująco rozwiązane. W literaturze brak jest opracowań uzasadniających wybór odpowiednich miar stanu procesu utworzonych z sygnałów pomiarowych charakteryzujących przebieg procesu lub jakość technologiczną przedmiotu. Mimo ugruntowania się poglądu, że potrzeba wiarygodnej diagnostyki procesu prowadzi do zastosowania zaawansowanych metod z zakresu metod pomiarowych, przetwarzania sygnałów, modelowania i komputerowych metod wspomagania decyzji, brak jest prac poświęconych ocenie efektywności tych metod w zastosowaniu do tego celu. Taki stan omawianych zagadnień podyktował cele pracy.

Celem nadrzędnym pracy jest opracowanie ogólnych zasad i wytycznych do budowy strategii identyfikacji stanu procesu w głębego zewnętrznego szlifowania walcowego w kłach opierających się na pomiarach sygnałów pośrednio charakteryzujących ten stan, mających na celu zastosowanie automatycznego nadzorowania tego procesu. Na przedmiot rozważań wybrano w głębne zewnętrzne szlifowanie walcowe w kłach, ponieważ jest ono jedną z najpowszechniej stosowanych odmian szlifowania i charakteryzuje się szeregiem specyficznych cech wynikających z uwarunkowań kinematyczno-geometrycznych. Zarówno przedmiot, jak i narzędzie w tej odmianie szlifowania wykonują ruch obrotowy. Zjawiska towarzyszące powstawaniu wióra w tych warunkach są przyczyną szybkiego rozwoju drgań samowzbudnych, mających istotny wpływ na dokładność geometryczną przedmiotu obrabianego i przebieg zużycia ściernicy. Wobec dużej losowości rozwoju tych zdarzeń [Hamr-90, Kaca-88, Kloc-09, MaGu-08], najkorzystniejszym sposobem prowadzenia procesu wydaje się być zastosowanie automatycznego nadzorowania. Warunki kinematyczne tej odmiany szlifowania stwarzają również istotne problemy z pomiarem wielkości charakteryzujących proces, a co za tym idzie, również ze znalezieniem odpowiednich metod przetwarzania sygnałów pomiarowych. W dalszej części pracy, w głębne zewnętrzne szlifowanie walcowe w kłach będzie określane w skrócie mianem w głębnego szlifowania kłowego.

Ocena stanu procesu powinna odbywać się podczas szlifowania w różnych warunkach i z różnymi parametrami obróbki. Z tego względu strategię identyfikacji powinny wynikać z teoretycznej analizy zjawisk mających istotny wpływ na przebieg i wyniki procesu szlifowania. Pozwoli to na wyprowadzenie uogólnień, które powinny być poparte wynikami badań doświadczalnych.

Dla osiągnięcia tak sformułowanego celu nadrzędnego konieczne jest:

1. Ustalenie adekwatnych miar stanu procesu stanowiących jego symptomy dla różnych kryteriów oceny wyników procesu szlifowania. Miary te, aby mogły być wykorzystane w inteligentnych systemach nadzorowania, muszą być

- utworzone z sygnałów pomiarowych wielkości charakteryzujących przebieg i wyniki procesu.
2. Opracowanie zaleceń dla systemu monitorowania umożliwiającego generowanie właściwych sygnałów pomiarowych i określenie metod przetwarzania tych sygnałów wyznaczających symptomy stanu procesu.
 3. Opracowanie metodyki identyfikacji stanu procesu dla różnych kryteriów oceny jego wyników.
 4. Opracowanie modelu procesu umożliwiającego dokonywanie skutecznej oceny jego stanu na podstawie wielu miar uzyskiwanych z różnych sygnałów pomiarowych.
 5. Weryfikacja efektywności opracowanych metod identyfikacji stanu procesu szlifowania.

Cel pracy i wynikające z niego zadania do realizacji zostały sformułowane w taki sposób, aby możliwe było udowodnienie tezy mówiącej, że **skuteczne nadzorowanie procesu szlifowania wymaga uzyskania danych charakteryzujących proces ze względu na różne ograniczenia i kryteria oceny, którym podlega. Dane te możliwe są do uzyskania z sygnałów pomiarowych charakteryzujących możliwie wszechstronnie stan i wyniki procesu. Jednak wobec losowego charakteru procesu szlifowania i trudności w realizacji pomiarów w warunkach przemysłowych, uzyskane dane o procesie są często niepewne, nieostre, niepełne, a nawet sprzeczne. Okoliczności te leżą u podstaw drugiej tezy mówiącej, że skuteczne nadzorowanie procesu szlifowania jest zadaniem z zakresu wielokryterialnego wspomaganie decyzji w warunkach niepewności. Automatyzacja tego zadania jest możliwa poprzez zastosowanie komputerowo wspomaganych metod odkrywania wiedzy z danych niepewnych i nieostrych.**

Zakres i układ pracy wynikają z realizacji postawionych celów.

Rozdział 2 ma charakter wprowadzający. Na wstępie podano znaczenie podstawowych pojęć z zakresu monitorowania, diagnostyki i nadzorowania jakie przyjęto w pracy. Pozwoliło to na ustalenie zależności istniejących pomiędzy nimi. Dalsza część rozdziału to przegląd stanu wiedzy w zakresie zagadnień związanych z problematyką nadzorowania procesów szlifowania. Omówiona została ogólna struktura stosowanych układów pomiarowych, przykłady realizacji konkretnych pomiarów wraz z analizą ich efektywności w nadzorowaniu oraz dokonano przeglądu stosowanych metod modelowania i klasyfikacji stanu procesu szlifowania.

W następnym rozdziale przeprowadzono teoretyczno-doświadczalną analizę procesu szlifowania wgłębnego kłowego jako obiektu nadzorowania. Za punkt wyjścia w tej analizie przyjęto tzw. zalecany obszar parametrów nastawnych szlifowania. Wyznacza on ograniczenia, którym podlega proces. Tym samym zalecany obszar szlifowania określa parametry procesu i jakości przedmiotu szlifowanego, które powinny być objęte nadzorowaniem. Przeprowadzono w związku z tym analizę zjawisk i procesów powiązanych z tymi

wielkościami. Pozwoliło to ustalić warunki zrealizowania automatycznego nadzorowania procesu. Warunki te dotyczą zarówno układów monitorowania, jak i zastosowania odpowiednich metod identyfikacji stanu i wyników procesu. W podsumowaniu sformułowano ogólne zasady i praktyczne wytyczne do budowy inteligentnego systemu nadzorowania procesu szlifowania węgelnego kłowego.

Rozdział 4 poświęcony jest jakościowej ocenie przydatności ustalonych w poprzednim rozdziale wielkości procesowych do nadzorowania szlifowania węgelnego kłowego w oparciu o przeprowadzone badania doświadczalne. Ocena ilościową i selekcję miar sygnałów przeprowadzono w rozdziale następnym równoległe z klasyfikacją stanu procesu. Dzięki temu ocena przydatności miar uwzględnia wpływ zastosowanego algorytmu klasyfikacji oraz współzależności zachodzące między zastosowanymi miarami. Na wstępie przedstawiono stanowisko badawcze oraz warunki i zakres przeprowadzonych doświadczeń. Następnie omówiono wyniki pomiarów bezpośrednich miar stanu CPS i jakości przedmiotu szlifowanego oraz miar wielkości procesowych skorelowanych z makro- i mikrogeometrią CPS, uszkodzeniami cieplnymi WW przedmiotu i chropowatością powierzchni szlifowanej. Przeprowadzone badania doświadczalne pozwoliły na sformułowanie hipotez co do przydatności wybranych wielkości procesowych i metod przetwarzania sygnałów do nadzorowania procesu. Hipotezy te w postaci wniosków z badań doświadczalnych podano w podsumowaniu rozdziału.

W rozdziale 5 wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych wykorzystano do budowy klasyfikatora stanu procesu w oparciu o zastosowanie teorii zbiorów przybliżonych rozszerzonej o relację dominacji (DRSA). Metodologia ta umożliwiła także przeprowadzenie ilościowej oceny przydatności wyznaczonych miar sygnałów i ich selekcji. Sporządzono regułowy model zależności pomiędzy obserwowalnymi miarami sygnałów pomiarowych oraz wielkościami wejściowymi procesu a wielkościami wyjściowymi. Reguły mają postać wyrażeń logicznych, które w sposób jawny reprezentują wiedzę o procesie i posiadają zdolność objaśniania proponowanych decyzji. Otrzymane reguły decyzyjne zweryfikowano poprzez wyznaczenie dla każdego wygenerowanego zbioru wskaźnika trafności klasyfikacji oraz macierzy pomyłek klasyfikacji. Zastosowano w tym celu metodę leave-one-out. Zweryfikowane zbiory reguł decyzyjnych mogą następnie służyć do klasyfikacji nowych przypadków w inteligentnym systemie nadzorowania procesu szlifowania węgelnego kłowego. Rozdział zakończono podsumowaniem wyników zastosowania DRSA do klasyfikacji stanu i wyników procesu.

Praca zakończona jest podsumowaniem wszystkich wyników i wynikających z nich wniosków.

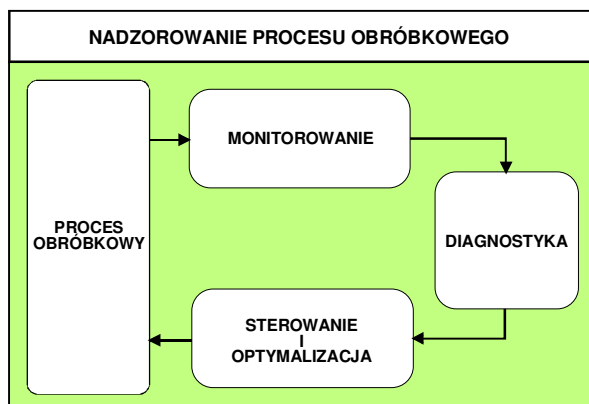
2. SYSTEMY AUTOMATYCZNEGO NADZOROWANIA PROCESÓW SZLIFOWANIA

2.1. Automatyczne nadzorowanie procesów obróbkowych

W literaturze poświęconej zagadnieniom automatyzacji procesów obróbkowych nie ma jednoznaczności co do znaczenia terminów: monitorowanie, diagnostyka, sterowanie oraz nadzorowanie. W pracach anglojęzycznych używa się prawie wyłącznie terminu „monitoring” (monitorowanie) na określenie zespołu czynności związanych z identyfikacją stanu procesu oraz terminu „control” (sterowanie) na określenie czynności związanych z oddziaływaniem na proces w celu dokonania korekcji jego stanu [Inas-98, Liao-10, TJOD-10, TöFB-02, WaGa-06, WeMB-94, WHKK-11]. Często systemy realizujące obie grupy tych czynności określane są po prostu jako systemy monitorowania [KaWI-00]. W Polsce istnieje natomiast tendencja do precyzyjniejszego nadania znaczeń poszczególnym terminom. Według Słownika Języka Polskiego PWN „nadzór” w znaczeniu używanym w technice to „sprawowanie opieki i kontroli nad prawidłowością przebiegu produkcji, sprawnością maszyn i urządzeń oraz prawidłowością ich użytkowania”, natomiast „sterowanie to oddziaływanie na jakiś mechanizm w celu wywołania zmian wielkości określających wynik pracy tego mechanizmu”. Podobnie w literaturze z zakresu automatyki [Żela-76], przez sterowanie rozumie się oddziaływanie na jakiś proces w celu uzyskania jego pożądanego przebiegu. Zwyczajowo przyjęte jest używanie terminu „sterowanie” w przypadku oddziaływania na proces w krótkim horyzoncie czasowym, np. w odniesieniu do pojedynczego przedmiotu lub procesu. Natomiast o nadzorze mówi się wówczas kiedy uwzględniane są również zmiany zachodzące w obiekcie w dłuższych okresach czasu eksploatacji [Hamr-90, Śpie-95]. Można zatem przyjąć, że nadzór jest pojęciem szerszym w stosunku do sterowania, ponieważ łączy w sobie zadania monitorowania, diagnostyki, sterowania, jak również optymalizacji procesu [Inas-98, KaWI-00, KrLa-05, Szaf-88, SzCh-90, WaGa-06].

Potrzeba automatyzacji procesów obróbkowych, czyli eliminacji bezpośredniego udziału człowieka z ich nadzorowania jest obecnie jednym z najważniejszych czynników stymulujących rozwój technologii wytwarzania. Stwarza to konieczność budowy automatycznych systemów nadzorowania, które swoim działaniem obejmowałyby również wpływ zakłóceń rzadko występujących lub wolnozmiennych (w tym cyklicznych), takich np. jak awaria układu chłodzenia czy zużycie narzędzia. Uwzględniając te zakłócenia, automatyczny system nadzorowania zapewnia akceptowalny stan procesu obróbkowego, dążąc do stanu optymalnego w danych warunkach, przy czym nadrzędnym celem jest uzyskanie wymaganego poziomu jakości przedmiotu obrabianego i wydajności. Automatyczny system nadzorowania obejmuje

diagnostykę, która oprócz wykrywania nieprawidłowości w stanie procesu, czyli jego monitorowania, ustala przyczyny tych nieprawidłowości, a to z kolei stanowi podstawę do doboru właściwego sterowania i optymalizacji procesu. Takie rozumienie współzależności pomiędzy monitorowaniem, diagnostyką, sterowaniem i nadzorowaniem procesów obróbkowych przyjęto w niniejszej pracy. Współzależności te ilustruje rys. 2.1.



Rys. 2.1. Współzależności pomiędzy monitorowaniem, diagnostyką, sterowaniem i nadzorowaniem procesów obróbkowych

Podobny schemat współzależności pomiędzy elementami nadzorowania procesów szlifowania został przyjęty przez A. Hamrola w pracy [Hamr-90] oraz H. Tönshoff'a i in. w pracy [TöFB-02]. Schemat ten ma zastosowanie również dla systemów konwencjonalnych, ale wówczas zadania monitorowania oraz diagnostyki, a także częściowo sterowanie i optymalizacja wykonywane są przez operatora.

Istotnym elementem każdego procesu szlifowania jest obciążanie ściernicy. Decyduje ono o jej kształcie geometrycznym i o topografii jej powierzchni czynnej, a tym samym ma wpływ na wyniki szlifowania. Z tego względu monitorowanie obciążania ściernicy mające na celu nadanie jej odpowiednich parametrów powinno być objęte nadzorowaniem [Kloc-09]. W pracy tej nie jest ono jednak omawiane, ponieważ temu zagadnieniu poświęconych jest bardzo wiele prac [WHKK-11], a ponadto wpływ obciążania na przebieg omawianego w pracy procesu szlifowania w głębokiego jest ograniczony do stosunkowo krótkiego, początkowego fragmentu okresu trwałości ściernicy. Jest to widoczne w rozdziale 4 na wykresach przebiegu różnych cech sygnałów pomiarowych w postaci zmiany charakteru tych przebiegów po szlifowaniu pierwszego przedmiotu.

Dla realizacji automatycznego nadzorowania procesu szlifowania ważne są również takie zagadnienia jak [Kloc-09]:

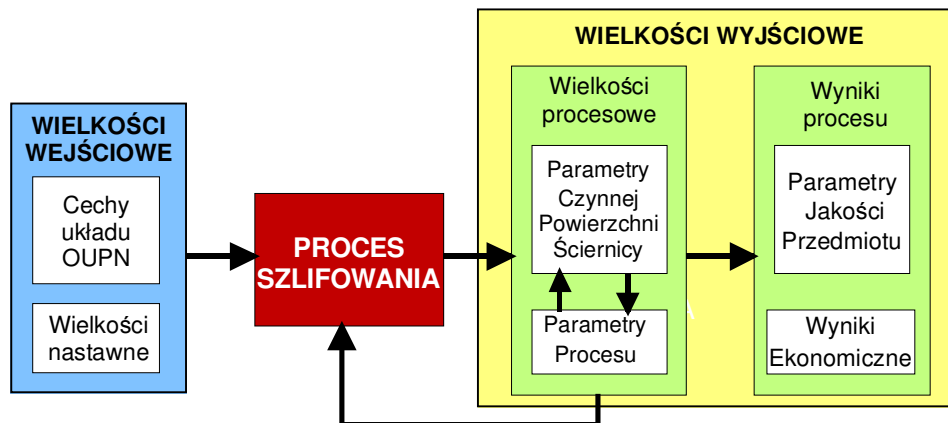
- wykrywanie pierwszego kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym,

- wykrywanie kolizji,
- monitorowanie poprawności zamocowania przedmiotu, dostarczania chłodziwa itp.

Są to zagadnienia ważne, ale obecnie w większości rozwiązane już na poziomie technicznym i dlatego również nie są w tej pracy omawiane.

2.2. Proces szlifowania jako obiekt nadzorowania

Schemat powiązań pomiędzy ustalonymi warunkami szlifowania, parametrami opisującymi przebieg procesu w czasie jego trwania oraz jego wynikami ilustruje rys. 2.2. Schemat ten może być podstawą do analizy tego procesu jako obiektu nadzorowania.



Rys. 2.2. Schemat powiązań pomiędzy wielkościami charakteryzującymi proces szlifowania

Wielkościami wejściowymi do procesu są:

- cechy statyczne i dynamiczne obrabiarki oraz przedmiotu,
- szlifowalność materiału przedmiotu obrabianego,
- cechy cieczy chłodziwo-smarującej i warunki jej podawania,
- cechy ściernicy i warunki jej obciążania,
- wielkości nastawne (dosuw, prędkość posuwu, prędkość przedmiotu, prędkość obwodowa ściernicy).

Bardziej ogólnie można powiedzieć, że wielkościami wejściowymi są wszystkie cechy układu OUPN oraz wielkości nastawne. Zakładając, że na proces nie oddziałują istotnie żadne czynniki zewnętrzne, w następstwie współdziałania wszystkich wielkości wejściowych oraz zwrotnego oddziaływania na proces niektórych wielkości wyjściowych, efektem procesu są wielkości wyjściowe. Jak w przypadku każdego procesu obróbczego, należy je

podzielić na dwa rodzaje wielkości. Pierwszy rodzaj to wielkości procesowe, charakteryzujące przebieg procesu. Mogą one być określone tylko w czasie jego trwania. Do wielkości procesowych należą:

- parametry czynnej powierzchni ściernicy (CPS),
- parametry procesu (moc szlifowania, siła szlifowania, drgania układu OUPN, emisja akustyczna, temperatura, odkształcenia układu OUPN).

Drugi rodzaj wielkości wyjściowych procesu to jego trwałe wyniki szlifowania, które mogą być ustalone po zakończeniu szlifowania. Należą do nich:

- parametry jakości przedmiotu (wymiar, kształt, chropowatość, właściwości warstwy wierzchniej),
- wyniki ekonomiczne (koszty, wydajność, zużycie ściernicy).

Wielkości wyjściowe działające zwrotnie na proces można traktować jak zakłócenia procesu. Należą do nich:

- zdolność skrawna ściernicy,
- drgania układu OUPN,
- wahania temperatury,
- zmiany właściwości cieczy chłodząco-smarującej.

Parametry makro- i mikrogeometrii CPS są w szlifowaniu jednym z głównych czynników kształtujących przebieg i wyniki tego procesu. Jednak możliwości pomiaru parametrów CPS w trybie on-line, są w praktyce bardzo ograniczone. Dlatego z punktu widzenia diagnostyki procesu, istotne jest istniejące wzajemne oddziaływanie pomiędzy parametrami CPS i parametrami procesu. Związki przyczynowo-skutkowe między tymi wielkościami są bardzo trudne, o ile w ogóle możliwe, do ustalenia w oparciu o interpretację zjawisk fizycznych leżących u podstaw procesu szlifowania, czyli na drodze budowania modeli fizycznych. Istniejące między tymi wielkościami korelacje mogą być jednak ustalone poprzez budowę modeli empirycznych lub fizyczno-empirycznych i służyć do oceny zużycia ściernicy.

Ostateczną ocenę procesu szlifowania stanowią parametry jakości przedmiotu oraz wyniki ekonomiczne. Efektywny pomiar parametrów jakości przedmiotu podczas trwania procesu jest jednak ograniczony do dokładności wymiaru i kształtu. Pomiar chropowatości powierzchni szlifowanej czujnikami laserowymi jak dotąd nie znalazł zastosowań przemysłowych, a ciągły pomiar parametrów stanu warstwy wierzchniej nawet po zakończeniu obróbki w warunkach przemysłowych jest wręcz niemożliwy [Leża-03, TöFB-02, WaGa-06]. Zakładając nawet, że pomiar wszystkich tych parametrów po zakończeniu operacji szlifowania jest możliwy, to rozwiązanie takie byłoby nieefektywne ze względu na czas potrzebny do przeprowadzenia tych pomiarów. Pozostaje zatem bezpośredni pomiar on-line wymiaru i kształtu przedmiotu oraz pośrednie określanie pozostałych parametrów jakości przedmiotu na podstawie pomiarów parametrów procesu. Podobnie jak w przypadku parame-

trów CPS, muszą być jednak znane związki korelacyjne jakie występują pomiędzy nimi.

W przypadku procesu szlifowania można założyć, że jego ekonomiczność sprowadza się do minimalizacji czasu cyklu roboczego i minimalizacji częstotliwości obciążania ściernicy [OcPo-86]. Uzyskiwanie zatem dobrych wyników ekonomicznych szlifowania jest możliwe poprzez monitorowanie i diagnostykę parametrów procesu i CPS.

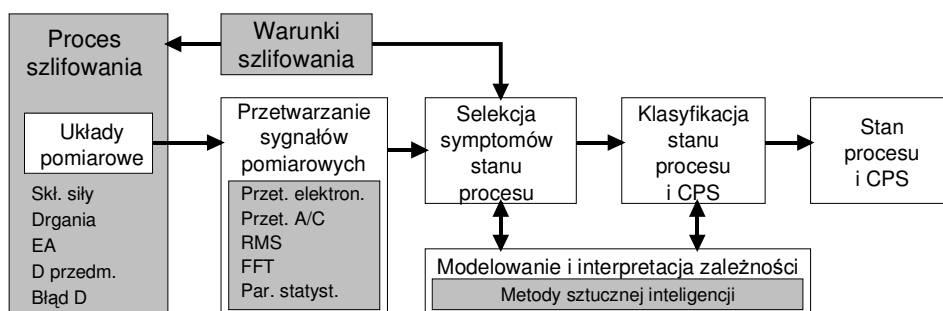
Z przeprowadzonej analizy wynika, że nadzorowanie procesu w inteligentnym systemie szlifowania kłowego powinno opierać się przede wszystkim na pomiarach parametrów procesu uzupełnionych pomiarami wymiaru i kształtu szlifowanego przedmiotu. Jest to bowiem jedyna grupa wielkości wyjściowych, które są możliwe do pomiaru w trakcie trwania procesu. Ponadto wielkości te są skorelowane z parametrami CPS i pozostałymi parametrami jakości przedmiotu. Ustalenie tych korelacji oraz ich interpretacja w postaci zidentyfikowania nieprawidłowych stanów procesu są zadaniem systemu monitorowania. Zadaniem diagnostyki jest następnie ustalenie przyczyn zaistniałych nieprawidłowości w przebiegu procesu.

2.3. Monitorowanie procesu szlifowania

2.3.1. Ogólna charakterystyka układów monitorowania

Podstawą każdego automatycznego systemu nadzorowania jest układ monitorowania procesu, czyli co najmniej jeden lub więcej przetworników pomiarowych generujących sygnały pozwalające na wyznaczenie wybranych wartości cech tych sygnałów, charakteryzujących stan procesu. Jeśli wyznaczone wartości cech sygnałów pomiarowych są skorelowane z miarą poszukiwanego stanu procesu, to stanowią symptomy tego stanu [Cemp-89]. Wartości cech sygnałów pomiarowych są również określane jako zmienne procesowe [KKKC-02].

Podstawowe moduły funkcjonalne, które powinien zawierać układ nadzorowania procesu przedstawia rys. 2.3.



Rys. 2.3. Podstawowe moduły funkcjonalne układu nadzorowania procesu

O praktycznej przydatności poszczególnych zmiennych procesowych do monitorowania procesu szlifowania decyduje nie tylko stopień ich skorelowania ze stanem procesu, ale także możliwość ich wyznaczenia w czasie rzeczywistym w oparciu o pomiary wielkości fizycznych charakteryzujących proces. Pomiary te muszą być wykonane w czasie rzeczywistym (ang. on-line), czyli podczas trwania cyklu szlifowania, ewentualnie tuż po jego zakończeniu, w sposób niepowodujący ingerencji we właściwości statyczne i dynamiczne układu OUPN oraz niepowodujący dodatkowych ograniczeń eksploatacyjnych obrabiarki.

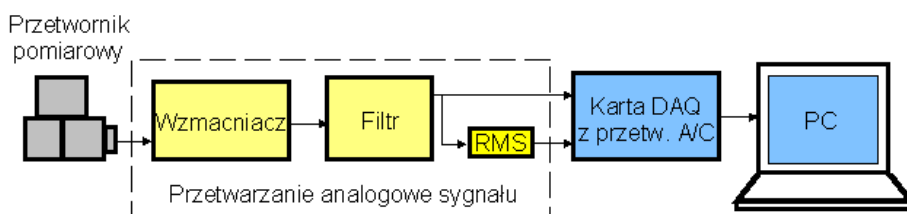
Powyższe uwarunkowania powodują, że możliwości pomiaru w trybie on-line parametrów stanu czynnej powierzchni ściernicy (CPS) są bardzo ograniczone [Kozi-96, LTQB-07, ReWe-95, WaGa-06, WHKK45-11]. Ponadto niejawna jest zależność pomiędzy tymi parametrami a wynikami szlifowania, które są podstawą do ostatecznej oceny procesu. Niestety, równie ograniczone możliwości istnieją ciągle w zakresie pomiaru chropowatości i właściwości warstwy wierzchniej przedmiotu [JBMA-11, TJOD-10, TöFB-02, WaGa-06]. W praktyce przemysłowej możliwy jest efektywny pomiar w trybie on-line jedynie średnicy i błędów kształtu szlifowanego wałka. Z tych względów, grupą praktycznie mierzalnych wielkości procesowych są parametry stanu procesu. Należą do nich [InKL-01, TJOD-10, TöFB-02]: składowe siły szlifowania, moc szlifowania, drgania układu OUPN, emisja akustyczna, temperatura w strefie skrawania i odkształcenia układu OUPN. Między wymienionymi parametrami stanu procesu a parametrami stanu ściernicy i jakości technologicznej przedmiotu istnieją związki korelacyjne, które mogą być następnie wykorzystane w nadzorowaniu procesu. Ze względu na znaczenie tych zagadnień, charakterystyka najczęściej stosowanych układów pomiarowych, przydatność poszczególnych pomiarów dla nadzorowania szlifowania oraz przykłady zastosowań omówiono oddzielnie w następnych podrozdziałach

Układ monitorowania procesu może być wyposażony w jeden lub więcej przetworników pomiarowych. Ponadto, w wyniku przetwarzania sygnału pomiarowego, każdy przetwornik pomiarowy może być źródłem dla wyznaczenia wielu cech tego samego sygnału pomiarowego, w różny sposób charakteryzujących stan procesu. Takie przetworniki określa się mianem czujników inteligentnych [AJKS-96, Koza-05, Kwaś-93, TöNi-95, TWKK-88, WaGa-06]. W każdym przypadku, w którym analizowanych jest wiele zmiennych procesowych konieczne jest zastosowanie integracji cech sygnałów pomiarowych w postaci modelu relacji pomiędzy tymi cechami a wybranymi wskaźnikami stanu procesu.

Budowa układów pomiarowych do monitorowania procesów obróbki mechanicznej jest jednym z trudniejszych zagadnień [BDIK-95, TJOD-10, TöFB-02, WaGa-06]. Trudność polega na spełnieniu wysokich wymagań jakie są im stawiane. Do najważniejszych z nich należą:

1. Duża niezawodność działania i niewrażliwość na zakłócenia spowodowane środowiskiem obrabiarki (ciepło, obecność chłodziwa itd.) oraz pewność transmisji sygnału pomiarowego.
2. Brak dodatkowych ograniczeń eksploatacyjnych obrabiarki oraz niezmiennosć właściwości statycznych i dynamicznych układu OUPN po zamontowaniu czujnika.
3. Prostota i łatwość instalacji czujnika w układzie OUPN, możliwie blisko strefy obróbki.
4. Posiadanie wszystkich uniwersalnych cech dobrego układu pomiarowego, takich jak: liniowość i stabilność czasowa charakterystyki statycznej, dobre właściwości dynamiczne (stała czasowa poniżej 1 ms), wysoka czułość w szerokim zakresie pomiarowym oraz łatwość kalibracji.
5. Dostępność handlowa.

Konfigurację typowego układu pomiarowego dla potrzeb monitorowania procesów przedstawiono na rys. 2.4.



Rys. 2.4. Konfiguracja typowego układu pomiarowego dla potrzeb monitorowania procesów

Zdecydowana większość stosowanych czujników to analogowe przetworniki pomiarowe, w których mierzona wielkość fizyczna przetwarzana jest na analogowy sygnał elektryczny [BDIK-95, TJOD-10, TöFB-02, WaGa-06]. Stosowane są zarówno przetworniki czynne (np. piezoelektryczne, indukcyjne), jak i bierne (np. tensometryczne, magnetostrykcyjne). Sygnały wychodzące z przetworników nie mogą być bezpośrednio wykorzystane, ponieważ są „zaszumione” i ich parametry nie są dostosowane do urządzeń rejestrujących. Wynika z tego konieczność ich odpowiedniego przetworzenia i analizy.

W pierwszej fazie sygnały pomiarowe poddawane są przetwarzaniu analogowemu, to jest wzmocnieniu celem dopasowania poziomu sygnału do wymagań dalszego przetwarzania i rejestracji oraz filtracji mającej na celu wyselekcjonowanie składowej użytecznej sygnału, w tym filtracji antyaliasingowej. Ponadto w tej fazie przetwarzania sygnał może być analogowo całkowany, różniczkowany lub może być analogowo wyznaczana jego wartość skuteczna (ang. RMS od Root Mean Square).

Przebieg sygnału może być rejestrowany analogowo lub cyfrowo. Ostatnio, wobec upowszechnienia się komputerów, stosuje się prawie wyłącznie

rejestrację cyfrową. Zalety takiego zapisu to możliwość dalszej analizy za pomocą algorytmów przetwarzania cyfrowego oraz łatwiejsza eliminacja zakłóceń od nośnika i urządzenia odczytującego. Rejestracja i analiza cyfrowa sygnału wymagają zastosowania w torze pomiarowym przetwornika analogowo-cyfrowego (A/C), który obecnie najczęściej jest elementem karty pomiarowej (ang. DAQ od Data Acquisition) będącej specjalistycznym wyposażeniem komputera.

Po przetworzeniu z postaci analogowej na cyfrową, sygnał jest rejestrowany w pamięci komputera jako szereg czasowy liczb binarnych reprezentujących wartość sygnału w kolejnych chwilach czasowych wyznaczonych okresem próbkowania i może być następnie poddany przetwarzaniu algorytmicznemu w dziedzinie czasu lub w dziedzinie częstotliwości w systemie on-line (tzn. w czasie trwania pomiaru) lub off-line (tzn. po zakończeniu pomiaru) [TJOD-10]. Sygnał w postaci analogowej może być analizowany i rejestrowany przez urządzenia analogowe.

Kolejna faza przetwarzania algorytmicznego sygnału ma na celu wyznaczenie takich jego cech (nazywanych również miarami), które będą skorelowane z miarą poszukiwanego stanu procesu. Cechy te mogą być wyznaczane z przebiegu czasowego sygnału, a także z jego transformaty częstotliwościowej lub częstotliwościowo-czasowej. Liczba potencjalnie możliwych do zastosowania metod wyznaczania cech sygnałów jest nieograniczona, zależy wyłącznie od stanu wiedzy w zakresie odpowiednich algorytmów matematycznych. W praktyce jednak, w ramach przetwarzania cyfrowego przebiegów czasowych sygnałów w systemach monitorowania procesów obróbczych najczęściej stosuje się [Jemi-11, TJOD-10]:

1. wyznaczanie wartości skutecznej (RMS),
2. wyznaczanie różnego rodzaju wskaźników opisujących przebieg jednego sygnału lub relację między wieloma sygnałami (np. stosunek składowych siły skrawania),
3. wyznaczanie parametrów rozkładu statystycznego (średnich, wariancji, momentów statystycznych, rozstępu, współczynnika zmienności, współczynnika autokorelacji itp.),
4. modelowanie sygnału za pomocą wielomianów i wyznaczanie parametrów tych modeli (model autoregresji, model średniej ruchomej),
5. wyznaczanie parametrów analizy składowych głównych.

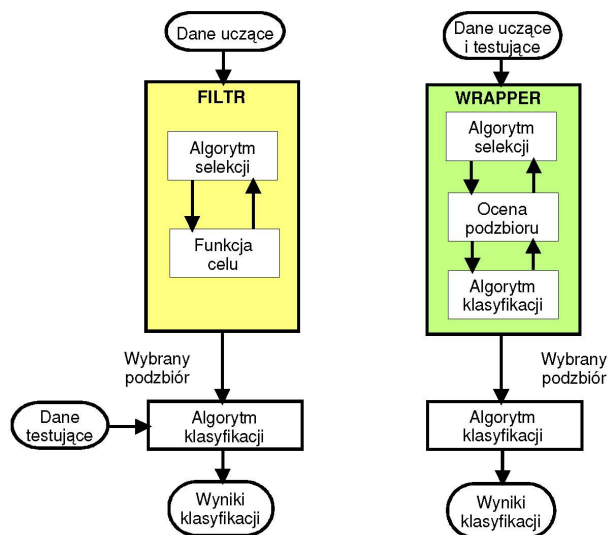
W przypadku sygnału w postaci jego transformaty częstotliwościowej lub częstotliwościowo-czasowej wyznaczane mogą być miary podane wyżej, a ponadto parametry specyficzne dla tego typu transformat takie jak średnia amplituda, moc widma lub entropia współczynników w wybranych zakresach częstotliwości.

Wyznaczony zbiór cech sygnału lub sygnałów pomiarowych może składać się z bardzo wielu elementów o różnym stopniu skorelowania z poszukiwaną miarą procesu, a więc jest najczęściej nadmiarowy z punktu

widzenia dokonania dobrej i efektywnej klasyfikacji stanu procesu. Jednocześnie wartości poszczególnych wyznaczonych cech sygnałów są obciążone błędami wynikającymi z trudnych warunków pomiaru. Mogą też występować współzależności pomiędzy poszczególnymi miarami i ich korelacją ze stanem procesu. Wynika z tego konieczność przeprowadzenia selekcji cech sygnałów ograniczającej ich zbiór tylko do tych, które zapewniają otrzymanie adekwatnego modelu stanu procesu, ale możliwie niezłożonego, o dużym stopniu ogólności i w stosunkowo krótkim czasie.

Selekcja cech sygnałów wymaga zastosowania strategii przeszukiwania przestrzeni możliwych kombinacji cech i określenia funkcji celu, czyli metody oceny przydatności danego zbioru cech do oceny stanu procesu. Strategie przeszukiwania można ogólnie podzielić na sekwencyjne i losowe, natomiast w ocenie przydatności zbiorów cech można zastosować dwa różne podejścia. Pierwsze z nich jest określane jako podejście oparte na filtrowaniu, a drugie na metodzie zwanej w języku angielskim „*wrapper approach*” [KoJo-97].

Na rys. 2.5 zilustrowano różnice między metodą filtrowania i *wrapper approach* stosowanych do oceny przydatności zbiorów cech sygnałów pomiarowych.



Rys. 2.5. Porównanie metody filtrowania i *wrapper approach* stosowanych do oceny przydatności zbiorów cech sygnałów pomiarowych

W metodzie opartej na filtrowaniu, optymalizacja zbioru cech sygnałów przeprowadzana jest poprzez bezpośrednią ocenę informacji zawartej w danym zbiorze na podstawie miar odległości między klasami, zależności statystycznych lub innych teoretycznych miar informacji. Krótki przegląd stosowanych miar można znaleźć w [Jemi-11, TJOD-10]. W metodzie filtrowania nie są zazwyczaj

stosowane obliczenia iteracyjne, w związku z czym proces selekcji przeprowadzany jest szybciej niż proces uczenia klasyfikatora. Ponadto, brane są pod uwagę przede wszystkim właściwości samych sygnałów bez uwzględniania istniejących między nimi współzależności i oddziaływania na przyjęty później algorytm klasyfikacji. Dzięki temu wyniki selekcji wykazują większą uniwersalność, tzn. są akceptowane przez szeroką gamę klasyfikatorów, ale zbiory cech wyselekcjonowane jako optymalne są często bardzo liczne, co odbija się na jakości klasyfikacji i czasie potrzebnym do jej przeprowadzenia [KoJo-97].

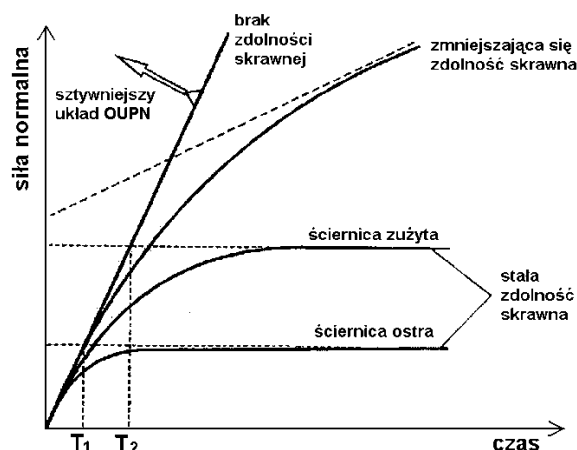
W *wrapper approach* ocena przydatności danego zbioru cech sygnałów dokonywana jest na podstawie zdolności predykcyjnych zastosowanego klasyfikatora (np. poprzez określenie procentowego poziomu błędnych klasyfikacji) wykorzystującego dany zbiór. Do oceny jakości klasyfikacji stanu procesu, a tym samym jakości selekcji cech mogą być wykorzystane różne metody statystyczne, przy czym najczęściej stosowana jest walidacja krzyżowa [KoĆw-05]. Podstawowym kryterium wyboru zestawu miar sygnałów jest zatem minimalizacja ryzyka podjęcia błędnej decyzji o stanie procesu. Takie ogólne kryterium oceny skuteczności miar uwzględnia także wpływ algorytmu klasyfikacji i wówczas ocena przydatności miar jest również funkcją jakości klasyfikatora. Efektem jest zwykle wyższa jakość klasyfikacji niż w wyniku zastosowania metody filtrowania cech. Stosowanie walidacji krzyżowej zapobiega ponadto nadmiernemu dopasowaniu wyników selekcji i klasyfikacji do danych uczących. Wadą „*wrapper approach*” może być dłuższy czas wykonania potrzebnych obliczeń (klasyfikacja musi być przeprowadzona dla każdego badanego podzbioru cech sygnałów) oraz to, że wyselekcjonowany zbiór cech może być optymalny tylko dla zastosowanego klasyfikatora [KoJo-97].

2.3.2. Pomiary mocy oraz składowych siły szlifowania

Pomiary składowej normalnej i stycznej siły szlifowania oraz mocy szlifowania są podstawą jednej z częściej stosowanych pośrednich metod estymacji stanu procesu szlifowania. Wynika to z tego, że siła szlifowania, która poprzez swoją składową styczną jest ściśle powiązana z mocą szlifowania, dobrze odwzorowuje statyczne i dynamiczne właściwości obrabiarki i procesu.

Przy założeniu stałej wydajności objętościowej szlifowania lub niezmiennej zdolności skrawnej ściernicy, składowa normalna podczas szlifowania w głębokiego zmienia się wykładniczo w funkcji czasu szlifowania, dążąc asymptotycznie do pewnej wartości granicznej, czyli odzwierciedla opóźnienie położenia rzeczywistego ściernicy względem położenia zadanego wynikające z odkształcenia sprężystego układu OUPN [Hahn-84]. Odchylenia przebiegu siły i mocy szlifowania od krzywej wykładniczej charakteryzują rodzaj i stopień zużycia ściernicy. Ilustruje to rys. 2.6. Przebieg siły odpowiadający zmniejszającej się zdolności skrawnej ściernicy występuje w przypadku przewagi zużycia ściernego (mikrozużycia) CPS, natomiast stała zdolność skrawna

ściernicy, mimo postępującego zużycia kształtu jej bryły (makrozużycia), ma miejsce w przypadku przewagi samoostrzenia.



Rys. 2.6. Wpływ rodzaju i stopnia zużycia ściernicy na przebieg składowej normalnej siły szlifowania [TöFB-02] (tłumaczenie własne)

Z przebiegu siły lub mocy podczas szlifowania wglębnego można wyznaczyć stałą czasową stanów przejściowych, która zależy od właściwości skrawnych ściernicy [Hamr-90, Inas-91, XiMD-93, TöFB-02]. Należy jednak zaznaczyć, że zależności te są łatwiejsze do ustalenia kiedy sztywność układu OUPN jest mniejsza, np. dla szlifowania otworów.

Jednym z najprostszych, choć nie zawsze dostatecznie reprezentatywnych, wskaźników zdolności skrawnej ściernicy jest stosunek wydajności objętościowej szlifowania do wartości składowej normalnej K_z [OcPo-86], zastępowany czasem stosunkiem tej wydajności do składowej stycznej [Lajm-03]. Zastępowanie składowej normalnej składową styczną wynika z możliwości łatwiejszego pomiaru tej ostatniej. Przy założeniu, że moc jest iloczynem prędkości obwodowej i składowej stycznej, składową tę można wyznaczyć poprzez pomiar natężenia prądu pobieranego przez silnik napędzający ściernicę lub przedmiot. Jednakże w tym przypadku, zmiany prędkości obrotowej przedmiotu, tarcie w kłach mocujących przedmiot oraz zmiany w stosunku składowej stycznej do normalnej spowodowane zużywaniem się ściernicy powodują, że właściwości dynamiczne takiego pomiaru są niezadowalające [TöFB-02].

Z punktu widzenia nadzorowania, istotne znaczenie ma korelacja siły i mocy szlifowania z dokładnością wymiarowo-kształtową i pośrednio z chropowatością powierzchni oraz z temperaturą szlifowania, w wyniku której może dojść do uszkodzeń cieplnych powierzchni przedmiotu. Uzasadnia to nadzorowanie siły lub mocy szlifowania mające na celu nieprzekraczanie ich

wartości granicznych wynikających z wymienionych wskaźników jakościowych. Zasada ta została wykorzystana w wielu pracach. Autorzy pracy [KaLK-03] wykorzystali pomiar składowej normalnej do nadzorowania jakości w procesie szlifowania małych elementów ceramicznych. Pomiar mocy szlifowania w inteligentnych systemach szlifowania wałków mających na celu identyfikację zdolności skrawnych ściernicy oraz optymalizację warunków szlifowania i obciążania ściernicy zastosowano w [Inas-91, Inas-98, KaWI-00, XiMD-93]. R. Wójcik [Wójc-06] wykorzystał pomiary składowych siły szlifowania do określania właściwości warstwy wierzchniej przedmiotu po szlifowaniu. Natomiast P. Leżański [Leża-98, Leża-01a], A. Warkentin i R. Bauer [WaBa-03] oraz J.-S. Kwak i M.-K. Ha [KwHa-04] zastosowali pomiar składowych siły szlifowania do diagnostyki zdolności skrawnej ściernicy.

Pomiar siły lub mocy szlifowania może być także wykorzystywany do detekcji pierwszego kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym w celu skrócenia cyklu szlifowania poprzez likwidację tzw. szlifowania powietrza [Inas-85, TöFB-02]. Jednak sygnał emisji akustycznej jest do tego celu znacznie bardziej przydatny ze względu na dużo mniejsze opóźnienie i łatwiejszy pomiar.

Do pomiaru składowych siły szlifowania wykorzystuje się najczęściej pomiar odkształcenia lub naprężenia sprężystego w układzie OUPN wywołanego zmieniającą się siłą skrawania. W tym celu początkowo były stosowane czujniki tensometryczne, a następnie głównie piezoelektryczne [BDIK-95, TJOD-10, WaGa-06] w postaci płyt pomiarowych. Siły mogą też być wyliczane z wartości sygnału momentu, sygnału natężenia prądu lub napięcia silników napędowych (z zastrzeżeniami, których wspomniano wyżej) czy zmian ciśnienia w układach hydrostatycznych [LeRa-93 Lewa-02, Wrąb-93], o ile takie występują w danej obrabiarce. Ogólnie czujniki do pomiaru sił skrawania charakteryzują się względnie dobrą dynamiką, wysoką czułością (od 0,01 N), ale też, poza czujnikami piezoelektrycznymi, niską niezawodnością działania. Ponadto trudna instalacja czujników w układzie OUPN często powoduje zmiany właściwości tego układu. Wady te nie występują w przypadku czujników siły opartych na technologii mikrosystemów [Koza-05, TJOD-10]. Poziom dokładności tych czujników nie dorównuje jednak jeszcze czujnikom piezoelektrycznym.

Do pomiaru obciążenia silników napędowych stosowane są czujniki natężenia prądu zmiennego i stałego oraz czujniki mocy pobieranej przez napęd prądu stałego lub mocy czynnej w przypadku prądu zmiennego. Dotychczas najczęściej wykorzystywany był pomiar prądu za pośrednictwem czujnika Halla w jednej fazie i szybkie obliczenie mocy czynnej pobieranej przez silnik zgodnie z zależnością $P = UI \cos \phi$. Pomiar mocy, a także momentów i składowych siły szlifowania może być również zrealizowany bez stosowania dodatkowych czujników, a jedynie poprzez wykorzystanie wewnętrznych sygnałów układów napędowych. Nowe możliwości w zakresie takich pomiarów stwarzają nowoczesne, tzw. otwarte układy sterowania numerycznego (ang. open CNC)

[PrKr-05, TJOD-10, WaGa-06]. Podstawową zaletą wszystkich metod pomiaru obciążenia silników napędowych jest to, że nie zakłócają one procesu obróbczego. Są one tanie oraz proste do instalacji i eksploatacji, stąd są chętnie stosowane, ale posiadają istotne niekorzystne cechy. Sygnał pomiarowy charakteryzuje proces w sposób mocno zakłócony wpływem innych czynników, takich jak straty mocy w układzie kinematycznym, temperatura układu napędowego czy drgania i jest znacznie opóźniony (do 30 ms). Ponadto dynamika tych układów pomiarowych jest niska.

2.3.3. Pomiary drgań

W tradycyjnie nadzorowanym szlifowaniu, dźwięki generowane przez proces i obrabiarkę są dla operatora jednym z podstawowych źródeł oceny stanu ściernicy. Dlatego pomiar drgań słyszalnych (czasami z tego powodu określanych jako wibroakustyczne [Hamr-90]) generowanych przez układ OUPN jest naturalną metodą monitorowania szlifowania.

Podczas szlifowania powstają drgania mechaniczne zarówno wymuszone, jak i szczególnie niebezpieczne drgania samowzbudne, które prowadzą do utraty stabilności układu OUPN na skutek tzw. efektu regeneracji fal na ściernicy i przedmiocie obrabianym w wyniku ich wzajemnego oddziaływania na siebie w ruchu obrotowym podczas przebiegu procesu obróbki [Hamr-90, InKL-01]. Drgania wywołują wahania siły skrawania, wzrost hałasu, pogorszenie chropowatości i inne negatywne skutki. Oznacza to, że do ich pomiaru można wykorzystać szereg różnych wielkości procesowych stosowanych do monitorowania, takich jak: składowe siły szlifowania, emisja akustyczna oraz przemieszczenia, prędkość i przyspieszenie spowodowane drganiami w wybranych punktach układu OUPN. W praktyce najczęściej wykorzystuje się piezoelektryczne czujniki przyspieszeń, które umożliwiają pomiar drgań wybranego elementu obrabiarki lub przedmiotu obrabianego w układzie bezwzględny [InKL-01]. Zaletą tych czujników jest łatwy montaż w układzie OUPN oraz duża niezawodność.

Ważnym zagadnieniem jest rozmieszczenie czujników drgań [TöFB-02]. Należy wziąć pod uwagę następujące czynniki:

- rosnące zniekształcenie sygnału pomiarowego w miarę oddalania się od strefy skrawania,
- wpływ zewnętrznych i wewnętrznych zakłóceń na sygnał pomiarowy,
- rozkład podatności dynamicznej w układzie OUPN.

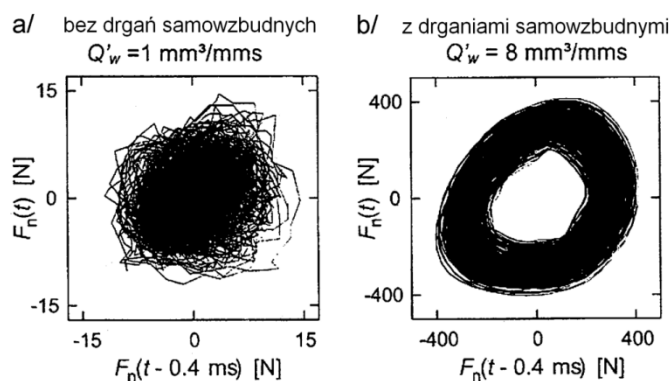
W praktyce, najlepsze miejsce pomiaru drgań ustalane jest doświadczalnie.

Pomiar drgań w systemach nadzorowania procesu szlifowania został zastosowany w wielu pracach [BaRW-92, CRLM-96, GBGK-02, Inas-91, Inas-98, KaWI-00, LeRa-93, Leża-01a, Leża-08, Leża-10a, Wrąb-93]. We wszystkich tych pracach pomiar drgań służy do detekcji zużycia ściernicy. W większości przypadków zastosowano metody analizy częstotliwościowej sygnału. W pracy

[Leża-08] autor wykorzystał do tego celu wielorozdzielczą analizę czasowo-częstotliwościową opartą o zastosowanie transformaty falkowej. Hosokawa i in. [HMYU-04] zaproponowali system monitorowania stanu ściernicy za pomocą analizy spektralnej sygnału dźwięku generowanego przez proces szlifowania walcowego wglębnego hartowanej stali narzędziowej ściernicą CBN.

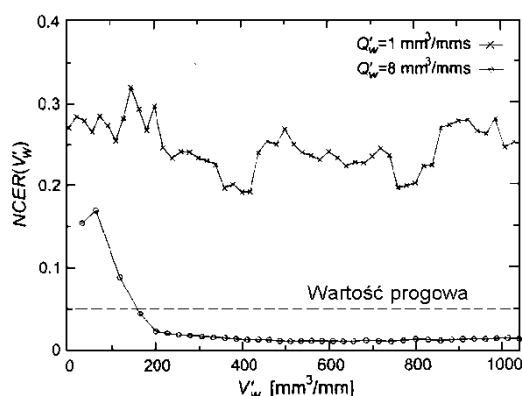
Na szczególną uwagę zasługuje praca [GBGK-02]. Do monitorowania zmian w dynamice procesu szlifowania wglębnego wałków zastosowano pomiar składowej normalnej siły szlifowania. W miejsce analizy częstotliwościowej tego sygnału, autorzy pracy zastosowali interesującą metodę detekcji drgań samowzbudnych poprzez wyznaczanie znormalizowanej szybkości zmian entropii (ang. normalized coarse-grained entropy rate – NCER) szeregu czasowego tej składowej. W teorii informacji, szybkość zmian entropii jest definiowana jako miara utraty informacji w czasie. Dla procesów, których stan zmienia się okresowo, w pojedynczym kroku czasowym prawie w ogóle nie następuje utrata informacji o stanie procesu w chwili poprzedniej i w związku z tym wartość NCER jest bliska zeru. Natomiast dla procesów, których dynamika ma charakter silnie losowy, utrata tej informacji jest prawie całkowita i NCER jest bliski jedności.

Na rys. 2.7 przedstawiono zmiany chwilowych wartości składowej normalnej siły szlifowania względem wartości opóźnionych o 0,4 ms wyznaczonych dla szeregów czasowych tej składowej składających się z 32768 próbek uzyskanych w czasie 1,63 s procesu szlifowania. Dla procesu bez drgań samowzbudnych brak jest widocznej zależności pomiędzy wartością chwilową siły i wartością względem niej opóźnioną. Dla procesu z obecnością drgań samowzbudnych, zależność ta jest już wyraźnie widoczna. W pierwszym przypadku wartość redundancji marginalnej szeregu czasowego, która jest miarą wartościującą zawartość średniej ilości informacji w danym szeregu, wyniosła około 3%, a w drugim przypadku – 18%.



Rys. 2.7. Zmiany chwilowych wartości składowej normalnej siły szlifowania względem wartości opóźnionych o 0,4 ms: a) proces bez drgań samowzbudnych, b) proces z obecnością drgań samowzbudnych [GBGK-02] (tłumaczenie własne)

Zaobserwowane różnice w ilości informacji zawartej w szeregach czasowych składowej normalnej siły stały się podstawą do zastosowania bardziej uogólnionej miary stanu drgań jaką jest NCER. Rys. 2.8 przedstawia zmiany tego wskaźnika dla procesu bez drgań i z obecnością drgań samowzbudnych.



Rys. 2.8. Zmiany NCER w funkcji właściwego ubytku materiału obrabianego dla procesu bez drgań ($Q_w' = 1 \text{ mm}^3/\text{mms}$) i z obecnością drgań samowzbudnych ($Q_w' = 8 \text{ mm}^3/\text{mms}$) [GBGK-02] (tłumaczenie własne)

Ustalono, że drgania samowzbudne występują dla wartości NCER mniejszej od 0,05 i wartość ta nie zależy od warunków szlifowania. Zaprezentowana metoda ma także inne zalety. Procedura wyznaczania skalarnej wielkości jaką jest NCER jest znacznie wygodniejsza niż procedury oparte na analizie spektralnej. Ponadto, obecność drgań samowzbudnych jest wykrywana w ich wczesnym stadium oraz niezależnie od częstotliwości tych drgań.

2.3.4. Pomiary emisji akustycznej

Emisja akustyczna (w skrócie EA lub AE od ang. acoustic emission) jest to zjawisko generowania pulsacji w materiale sprężystym podczas obciążenia powodującego zmiany jego struktury wewnętrznej, powstające w wyniku wyzwalań nagromadzonej w nim energii potencjalnej. Obróbka mechaniczna materiałów, w tym szlifowanie, wywołuje właśnie taki rodzaj obciążenia. W przypadku szlifowania, spośród wielu zjawisk składających się na zmiany strukturalne materiału, jedynie odkształcenia plastyczne, rozrywanie i tarcie mają praktyczne znaczenie jako źródła emisji akustycznej [KaDo-81]. Pulsacje generowane przez te zjawiska w miejscu tworzenia wióra powodują fale sprężyste na powierzchni materiału, które mogą być mierzone czujnikami piezoelektrycznymi. Moc sygnału EA jest bardzo mała, natomiast użyteczny zakres częstotliwości wynosi od około 30 kHz do 2 MHz, a więc leży znacznie

powyżej zakresu stosowanego przy pomiarach drgań i hałasu. Powoduje to duże trudności w wydzieleniu sygnału użytecznego od szumu oraz w próbkowaniu, rejestracji i analizie cyfrowej postaci sygnału [Jemi-01]. Z tych względów w analizie sygnałów EA, oprócz sygnału rzeczywistego, stosuje się często różne metody jego demodulacji [AJKS-96, Inas-98, Kloc-09, WaGa-06]. Szczególnie często w literaturze spotykane jest wyznaczanie wartości skutecznej (RMS) sygnału EA ze względu na jej równowartość energetyczną z sygnałem oryginalnym. Sygnał oryginalny EA często jest określany jako surowy sygnał EA (ang. raw AE signal).

Zagadnienie rozmieszczenia czujników EA musi być rozpatrywane podobnie jak w przypadku pomiaru drgań. Sygnał EA jest szczególnie mocno zależny od toru jego propagacji i parametrów pomiaru [DoCh-93, Jemi-02, Plic-02, WaGa-06]. Z tego względu czujnik EA powinien być umiejscowiony szczególnie blisko strefy skrawania i najlepiej po stronie ściernicy, ponieważ wówczas odległość pomiędzy źródłem sygnału a czujnikiem jest zawsze stała. W przypadku szlifowania walcowego jest to jednak utrudnione, ponieważ zarówno ściernica, jak i przedmiot obrabiany znajdują się w ruchu obrotowym. W związku z tym, oprócz typowych miejsc umieszczania takich czujników jakimi są elementy konstrukcji obrabiarki znajdujące się w pobliżu ściernicy lub przedmiotu, stosowane są czujniki z bezprzewodową transmisją sygnału montowane na czole wrzeciona ściernicy lub na pierścieniu związanym z przedmiotem [Kloc-09, LaLe-12, Leża-08, WaGa-06], czujniki powiązane z dyszą podającą chłodziwo, gdzie chłodziwo pełni rolę nośnika sygnału [Inas-98b, Kloc-09, WaGa-06], a także czujniki EA zintegrowane ze ściernicą o specjalnej konstrukcji (rozdział 2.3.5).

Już pierwsze prace w zakresie zastosowań emisji akustycznej do monitorowania procesów skrawania [DoKa-80, IwMo-77] wykazały, że istnieje dobra korelacja pomiędzy parametrami sygnału EA a parametrami skrawania oraz zużyciem narzędzia. D. Dornfeld i H. Cai [DoCa-84] przeprowadzili badania EA podczas szlifowania płaszczyzn i wykazali wzrost średniej wartości skutecznej EA wraz ze wzrostem dosuwu i zużycia ściernicy oraz dużą wrażliwość tego sygnału na wielkość szczeliny między ściernicą a przedmiotem obrabianym. Następnie I. Inasaki [Inas-85] potwierdził te właściwości EA dla szlifowania wałków i wykazał przydatność sygnału EA do monitorowania procesu obciążania ściernicy. Wnikliwe badania EA podczas szlifowania prowadził J. Webster i in. [WeDL-96, WeMB-94]. Badania te dodatkowo wykazały możliwość detekcji przypałów na powierzchni przedmiotu za pomocą monitorowania EA. Ponadto autorzy zwrócili uwagę na potencjał tkwiący w innych niż RMS metodach przetwarzania sygnału w dziedzinie czasu oraz w analizie spektralnej oryginalnego sygnału EA. Wobec trudności w zbudowaniu fizycznych modeli określających relacje pomiędzy sygnałem EA a zjawiskami dominującymi w szlifowaniu, dalsze prace skupiły się na poszukiwaniu modeli empirycznych wykorzystujących różne metody przetwarzania sygnału EA.

I. Grabec i in. [GrKu-94, SuGr-00] zastosowali sieć neuronową do modelowania zależności pomiędzy parametrami spectrum sygnału EA a funkcją korelacji zarysu profilu powierzchni obrabianej z uwzględnieniem stanu zużycia ściernicy podczas szlifowania wałków. Procedura uzyskania takiego modelu jest jednak dość skomplikowana, a poprawność uzyskanych wyników ograniczała się jedynie do przypadków szlifowania ściernicą o ustabilizowanej zdolności skrawnej.

I. Inasaki [Inas-98] oraz B. Karpuschewski i M. Wehmeier [KaWI-00] zaproponowali wykorzystanie składowej stałej (poniżej 10 Hz) oraz analizy spektralnej składowej dynamicznej (powyżej 1 kHz) obwiedni sygnału EA do monitorowania procesu obciążania ściernicy oraz do estymacji chropowatości powierzchni szlifowanej i optymalizacji cyklu szlifowania.

T.W. Liao i in. w szeregu prac [LHQB-06, LTQB-07, LTQB-08, Liao-10] badali możliwości wykorzystania sygnału EA do monitorowania stanu ściernicy podczas szlifowania płaszczyzn materiałów ceramicznych ściernicą diamentową. Stosowali oni różne metody ekstrakcji i selekcji miar sygnału EA w dziedzinie czasu i częstotliwości oraz różne metody klasyfikacji stanu ściernicy z zakresu metod statystycznych i metod sztucznej inteligencji. Podsumowanie wyników tych prac wykazało, że przeprowadzenie selekcji miar sygnału zawsze podnosi dokładność klasyfikacji, niezależnie od zastosowanej metody selekcji i rodzaju klasyfikatora, natomiast metoda selekcji miar i rodzaj klasyfikatora mają mniejsze znaczenie dla wyboru optymalnego zestawu miar i dla jakości klasyfikacji. Istotny wpływ na wynik klasyfikacji miała liczność wektora uczącego, a także stosowane parametry szlifowania. Jakość klasyfikacji mierzona procentem trafnych klasyfikacji wahała się od 70 do 100%. Najlepsze wyniki (nawet do 100%) uzyskano dla wyższych wartości właściwego ubytku materiału obrabianego, stosując dyskretną dekompozycję falkową sygnału EA i zastosowanie do klasyfikacji różnych metod analizy skupień opartej na macierzy odległości pomiędzy klasami obliczonych za pomocą ukrytych modeli Markowa [LHQB-06].

Szeroki przegląd różnych metod przetwarzania sygnału EA mających na celu wykrywanie przypaleń na powierzchni szlifowanej podano w [WWAW-01]. Autorzy tej pracy sprawdzili przydatność wielu cech statystycznych szeregu czasowego oryginalnego sygnału EA i jego spektrum jako bezpośrednich miar wystąpienia przypaleń oraz jako wielkości wejściowych radialnej sieci neuronowej do wykrywania przypaleń. Przydatność większości statystyk jako miar do bezpośredniego wykrywania przypaleń w oparciu o wyznaczanie wielkości progowych okazała się być bardzo ograniczona. Największą skuteczność osiągnęły skośność, kurtoza oraz stały współczynnik fałszywych alarmów (CFAR) stosowany w przetwarzaniu sygnałów radarowych. Skuteczność tych miar znacznie wzrosła kiedy zastosowano je jako wektor wejść do radialnej sieci neuronowej. Podobną skuteczność osiągnięto dla sieci o wejściach składających się z współczynników autoregresji Wienera.

Pomiar sygnału EA i pakietową analizę falkową do ekstrakcji jego cech w celu wykrycia przypaleń powierzchni szlifowanej przedmiotu wykonanego z Inconelu 718 ściernicą elektrokorundową wykorzystali również Q. Liu i in. [LiCG-05]. W selekcji cech sygnału i klasyfikacji zastosowali podejście typu wrapper (rozdział 2.3.1), używając rozmytej analizy skupień (ang. fuzzy clustering) metodą c-średnich. Na 13 testowanych przypadków otrzymali 1 błędne rozpoznanie.

Możliwości praktycznego wykorzystania wartości skutecznej sygnału EA do monitorowania i sterowania procesu szlifowania badała również S. Plichta ze współpracownikami. W pracy [PIDP-00] zaproponowano zastosowanie sygnału EA_{RMS} i jego energii w wektorze wejść sieci neuronowej do estymacji naprężeń w warstwie wierzchniej szlifowanych przedmiotów. W pracach [Plc-02, SuPl-03] potwierdzono dobrą korelację AE_{RMS} z chropowatością powierzchni szlifowanej i z naprężeniami w warstwie wierzchniej. Natomiast w pracy [SuPl-04] zaproponowano współczynnik ujmujący wartość skuteczną EA przypadającą na powierzchnię kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym do oceny zużycia ściernicy oraz wykazano możliwość wykorzystania w tej ocenie kurtozy wartości skutecznej EA.

Zastosowanie sygnału EA do oceny stanu zużycia ściernicy jest także przedmiotem zainteresowań badawczych autora niniejszej pracy. W pracach [Leża-93, LeRa-93] zaprezentowano wstępne wyniki badań doświadczalnych mających na celu ustalenie cech sygnału EA, zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości, wrażliwych na zmiany w stanie procesu szlifowania oraz ustalenie wpływu miejsca lokalizacji czujnika EA na wyniki pomiaru. Prace te wykorzystano i rozwinięto w budowie inteligentnego systemu monitorowania stanu ściernicy [Leża-98b, Leża-01a, Leża-01b]. Problemy związane z analizą spektralną oryginalnego sygnału EA zostały omówione w [LeLa-98, LeLa-99]. Udaną próbą ich rozwiązania jest wykorzystanie do tego celu wielorozdzielczej analizy czasowo-częstotliwościowej opartej o zastosowanie transformaty falkowej [Leża-08].

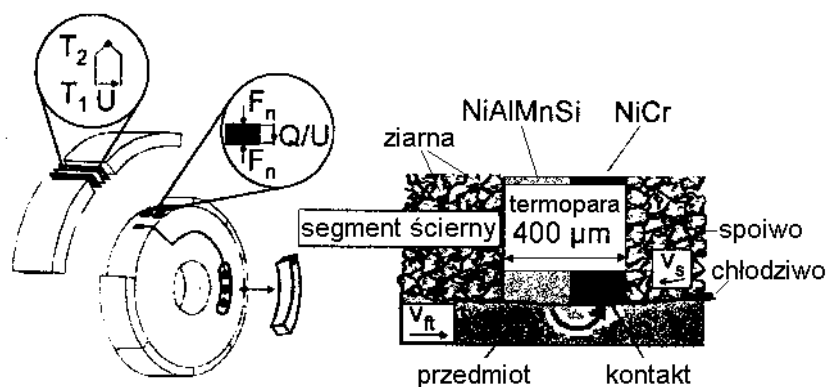
Bezspornie korzystnym zastosowaniem sygnału EA w szlifowaniu jest wykorzystanie jego wartości skutecznej do detekcji kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym lub obciążaczem. Sygnał EA wykazuje w tym względzie wyższość zarówno wobec sygnału mocy szlifowania [Inas-85], jak i składowej normalnej siły szlifowania [DoCa-84]. Z tego względu dostępnych jest szereg przemysłowych układów służących detekcji pierwszego kontaktu ściernicy z przedmiotem, jak i monitorowania przebiegu procesu obciążania ściernicy opartych o pomiar EA. J. Oliveira i D. Dornfeld [OIDW-94], wykorzystując ideę krzywej udziału materiałowego [LeLa-04, WHKK-11], wykazali, że szczególna czułość wartości skutecznej sygnału EA na warunki kontaktu w strefie styku ściernicy z obciążaczem lub materiałem obrabianym może być wykorzystana do scharakteryzowania parametrów CPS. W pracy [OIDo-01], poprzez optymalizację stałej całkowania wartości skutecznej

i częstotliwości jej próbkowania, autorzy rozwinęli pomysł zastosowania pomiaru EA do tworzenia binarnych obrazów topografii CPS i powierzchni przedmiotu. Metoda ta jednak nie wydaje się być dostatecznie skuteczna.

2.3.5. Ściernice zintegrowane z przetwornikami pomiarowymi oraz inne metody pomiarowe

Jak już wspomniano, istotne znaczenie w systemach monitorowania procesów obróbkowych ma lokalizacja czujników pomiarowych. Ogólną zasadą jaką należy się kierować jest umiejscowienie czujnika jak najbliżej źródła powstawania sygnału, czyli strefy obróbki. Bardzo innowacyjnym podejściem w tym względzie są ściernice zintegrowane z różnymi czujnikami [BrHM-05, Inas-98, KaWI-00, TöFB-02, VPGG-00].

Opisane dotychczas w literaturze ściernice zintegrowane z przetwornikami do pomiaru EA, siły lub temperatury szlifowania są to ściernice o nasypie diamentowym [VPGG-00] lub z CBN [Inas-98, KaWI-00, BrHM-05] wykonanym na obwodzie korpusu ze stopu aluminium. Do pomiaru EA i siły stosowane są miniaturowe przetworniki piezoelektryczne umieszczone w korpusie aluminiowym ściernicy tuż pod zewnętrzną warstwą ścierniwa. Do pomiaru temperatury natomiast [BrHM-05] zastosowano termopary warstwowe pomiędzy segmentami ściernymi ściernicy. Ideę budowy takiej ściernicy pokazuje rys. 2.9.



Rys. 2.9. Idea budowy ściernicy zintegrowanej z czujnikami siły i termoparami warstwowymi [BrHM-05] (tłumaczenie własne)

Budowa ściernic zintegrowanych z przetwornikami pomiarowymi wymaga rozwiązania szeregu problemów związanych z ich konstrukcją oraz z przetwarzaniem i transmisją sygnałów pomiarowych. Tabela 2.1 podaje zestawienie rozwiązań zastosowanych przez poszczególnych autorów w takich ściernicach.

Tabela 2.1. Zestawienie rozwiązań zastosowanych w budowie ściernic zintegrowanych z przetwornikami pomiarowymi

Rok	Autorzy	Zastosowane rozwiązania
1993 [Inas-98] 2000 [KaWI-00]	Inasaki, Karpuschewski, Wehmeyer	Czujnik EA, transmisja sygnału za pomocą komutatora
2000 [VPGG-00]	Varghese, Pathare, Gao, Guo, Malkin	Integracja czujników piezoelektrycznych do równoczesnego pomiaru siły i EA, bezprzewodowa transmisja sygnałów
2005 [BrHM-05]	Brinksmeier, Heinzel, Meyer	Integracja piezoelektrycznych czujników siły i termopar warstwowych, bezprzewodowa transmisja sygnałów

Zaprezentowane ściernice są interesującą alternatywą dla układów pomiarowych umiejscowionych na elementach obrabiarki lub przedmiotu obrabianego. Szczególne znaczenie ma możliwość praktycznego pomiaru temperatury szlifowania i integracji pomiarów wielu wielkości. Obiecującym kierunkiem rozwoju tych narzędzi wydaje się być zastosowanie technologii mikrosystemów w ich budowie [Koza-05, TJOD-10].

Omówione układy monitorowania szlifowania dotyczą pomiaru wielkości procesowych, które mogą być zaobserwowane i zmierzone tylko w trybie on-line, czyli podczas trwania procesu i w sposób pośredni charakteryzują one jego stan i wyniki. Druga grupa pomiarów dotyczy wielkości wyjściowych mających charakter trwały i w związku z tym ich określenie możliwe jest po zakończeniu procesu. Do tej grupy należą pomiary parametrów makro- i mikrogeometrii przedmiotu obrabianego i CPS oraz parametry fizyczne warstwy wierzchniej przedmiotu [Kloc-09]. Zdecydowana większość tych pomiarów wykonywana jest w trybie off-line z zastosowaniem metod niespecyficznych dla monitorowania procesów obróbkowych.

Do wyjątków można zaliczyć metody optyczne pomiaru parametrów struktury geometrycznej powierzchni, oparte o wykorzystanie światła laserowego [BrWe-92, TöFB-02]. Stwarzają one możliwości pomiaru zarysów profilu przedmiotu i CPS w czasie szlifowania. Ciągłe jednak nie udaje się pokonać ograniczenia prędkości liniowej powierzchni mierzonej do 20 m/s oraz trudności związanych z obecnością chłodziwa w strefie szlifowania.

2.4. Metody modelowania i klasyfikacji stanu procesu

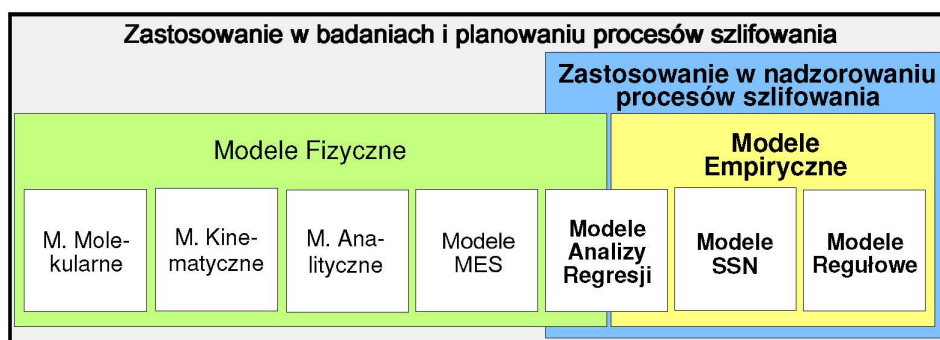
Obok wprowadzenia odpowiednich układów pomiarowych, największą trudnością do pokonania we wdrażaniu automatycznych systemów nadzorowania procesów obróbkowych jest brak miarodajnych modeli tych procesów [BAGH-06, MMBW-96, TöFB-02]. Znaczenie modelowania wynika z faktu,

że wobec braku możliwości pomiaru on-line większości wielkości wyjściowych procesu szlifowania, klasyfikacja stanu procesu wymaga posłużenia się modelem zależności pomiędzy wybranymi cechami sygnałów pomiarowych i wielkościami wyjściowymi procesu.

Układ monitorowania generuje jeden lub więcej sygnałów pomiarowych. W wyniku elektronicznego i algorytmicznego przetwarzania tych sygnałów, wyznaczane są z nich cechy, które stanowią symptomy stanu procesu właściwe dla przyjętych kryteriów jego oceny. Jednakże do wykonania tej oceny konieczna jest znajomość odpowiednich modeli opisujących zależność określonych stanów procesu i zużycia ściernicy od wyznaczonych symptomów. Przy czym przez stan procesu należy rozumieć stan dowolnej wielkości wyjściowej procesu wybranej jako kryterium jego oceny, np. wartość wybranego parametru chropowatości powierzchni szlifowanej czy wielkość naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego.

W badaniach procesu szlifowania stosowane są obecnie praktycznie wszystkie znane metody modelowania. W sposób najbardziej ogólny modele można podzielić na fizyczne i empiryczne. Modele fizyczne wyprowadzane są z praw fizyki procesu, przyjmując najczęściej postać zależności matematycznych. Natomiast modele empiryczne budowane są w oparciu o dane doświadczalne uzyskane w trakcie szlifowania, często bez możliwości fizycznej interpretacji uzyskanych wyników modelowania. Stosowane są też modele fizyczne o parametrach, których wartości ustalane są empirycznie np. za pomocą analizy regresji. Określa się je wówczas modelami fizyczno-empirycznymi. Właśnie tego typu modele dominowały w modelowaniu zjawisk procesu szlifowania do lat 90. XX wieku [TPIP-92]. Mimo wielkiej zalety modeli fizycznych, jaką jest możliwość stosowania tych samych modeli do różnych procesów szlifowania, ich wykorzystanie w systemach sterowania i nadzoru jest ograniczone. Mechanizm tworzenia wióra i procesy mu towarzyszące w przypadku szlifowania są szczególnie skomplikowane. Dlatego budowa modeli fizycznych opisujących proces szlifowania jest bardzo trudna, o ile w ogóle możliwa. Bardzo duży stopień trudności i nakład pracy potrzebny do budowy tego typu modeli wymusza stosowanie wielu uproszczeń mogących mieć istotne znaczenie w konkretnych przypadkach technologicznych.

W latach 90. gwałtowny rozwój technik komputerowych stworzył nowe możliwości w zakresie modelowania. Nastąpił rozwój budowy modeli fizycznych opartych o zastosowanie takich metod jak dynamika molekularna czy metoda elementów skończonych, natomiast metody sztucznej inteligencji stworzyły całkowicie nowe możliwości w zakresie modeli empirycznych [BAGH-06]. Kategorie i obszary zastosowań obecnych metod modelowania procesów szlifowania ilustruje rys. 2.10.



Rys. 2.10. Kategorie i obszary zastosowań metod modelowania procesów szlifowania

Jak wynika z przedstawionej w [BAGH-06] szerokiej analizy osiągnięć w zakresie modelowania i symulacji procesów szlifowania, w systemach nadzorowania znajdują zastosowanie prawie wyłącznie modele empiryczne. Głównie są to modele oparte na zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych lub modele regulowe oparte na bazach wiedzy reguł pewnych bądź niepewnych. W mniejszym stopniu wykorzystywane są modele fizyczno-empiryczne, głównie oparte na analizie regresji danych doświadczalnych.

Szerokiego przeglądu modeli fizyczno-empirycznych wszystkich podstawowych zjawisk procesów szlifowania dokonano w [TPIP-92]. Stosowana do otrzymania tych modeli analiza regresji danych doświadczalnych wymaga przeprowadzenia jednak wielu doświadczeń, a zakres stosowalności modelu jest zwykle ograniczony tylko do warunków, w których te doświadczenia przeprowadzono. Nowe możliwości w zakresie modelowania z wykorzystaniem metod statystycznych stwarzają ukryte modele Markowa [LHQB-06, Smyt-94, WaMK-01]. Nie wymagają one tak dużej liczby doświadczeń.

W zagadnieniach modelowania szczególne uznanie zyskało w ostatnich latach zastosowanie sztucznych sieci neuronowych (SSN), przy czym głównie stosowane są wielowarstwowe sieci jednokierunkowe z sigmoidalnymi lub radialnymi funkcjami aktywacji. Jednymi z pierwszych, którzy wykazali duże możliwości SSN w zakresie integracji sygnałów pomiarowych i modelowania procesów obróbkowych byli G. Chryssolouris [ChDo-89, ChDZ-90], D. Dornfeld [Dorn-90a, RaDo-90] i L. Monostori [Mono-86, MoBa-92]. Sztuczne sieci neuronowe charakteryzują się szeregiem zalet. Po pierwsze, model powstaje automatycznie w wyniku uczenia sieci na podstawie danych doświadczalnych i nie jest potrzebna do tego celu znajomość jakichkolwiek zależności analitycznych opisujących modelowane zjawiska. Jest to szczególnie korzystne przy modelowaniu obiektów nieliniowych i wielowymiarowych jak w przypadku szlifowania. Po drugie, modele neuronowe przetwarzają równolegle dane uczące z niezależnych źródeł, mają zdolność ich uogólniania i integracji oraz są

„odporne” na braki i błędy danych. Ważną cechą modeli neuronowych jest to, że mogą uzupełniać modele fizyczne, tworząc tzw. modele hybrydowe. Do wad modeli neuronowych należy zaliczyć brak możliwości objaśniania wiedzy zawartej w modelu (są to modele typu „czarna skrzynka”) i duże trudności w zakresie „douczenia” raz skonstruowanego modelu.

SSN znalazły zastosowanie w modelowaniu praktycznie wszystkich rodzajów procesu szlifowania i są wykorzystywane głównie w trzech następujących celach [BAGH-06]:

1. Przewidywanie wielkości wyjściowych szlifowania, takich jak chropowatość powierzchni szlifowanej czy naprężenia w warstwie wierzchniej.
2. Dobór optymalnych wielkości wejściowych szlifowania, zapewniających osiągnięcie wymaganych wyników procesu.
3. Monitorowanie szlifowania w celu wykrycia w jego przebiegu zjawisk niepożądanych, takich jak zużycie ściernicy czy uszkodzenia cieplne.

Przykładem wykorzystania SSN do przewidywania parametru R_a chropowatości powierzchni szlifowanej mogą być prace I. Inasaki’ego [Inas-95, Inas-98, KaWI-00]. Jako wielkości wejściowe do sieci zastosowano zestaw różnych miar sygnału EA i parametrów obróbki. M. Urbaniak w pracy [Urba-02] zaproponował hierarchiczny system oceny właściwości użytkowych ściernic dla szlifowania płaszczyzn. System ten, w oparciu o modelowanie neuronowe, przyjmując na wejściu sieci właściwości ściernicy oraz parametry obciągania i szlifowania, estymuje parametry topografii CPS, parametry rozkładu czynnych krawędzi skrawających oraz chropowatości i wartości naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu po szlifowaniu z tymi parametrami. Modelowanie to wykorzystano następnie w systemie doradczym projektowania operacji szlifowania [DęUr-02].

Jedno z pierwszych zastosowań SSN do optymalizacji szlifowania wałków zaprezentowano w [SaIn-92]. Sieć wykorzystano do ustalania optymalnego posuwu obciągania i głębokości szlifowania dla osiągnięcia założonej chropowatości powierzchni przedmiotu po szlifowaniu. Podobne zastosowania, dla innych kombinacji wielkości procesowych, a także innych odmian szlifowania można znaleźć w [BTCH-98, ChKu-98, LiCh-94, LiCh-98, MaAK-03]. W [Lajm-03, KrLa-05], w systemie nadzorowania i optymalizacji procesu szlifowania wzdłużnego wałków, zbudowano neuronowy model chropowatości i błędów kształtu przedmiotu oraz temperatury warstwy wierzchniej, a następnie wykorzystano ten model do optymalizacji posuwu osiowego i prędkości obwodowej przedmiotu mającej na celu maksymalizację wydajności przy zachowaniu ograniczeń wynikających z dopuszczalnego poziomu modelowanych wielkości. Prace [LiMR-97, LiRM-99, LRCM-99] stanowią interesujący przykład zastosowania SSN i wnioskowania opartego na analizie przypadków do optymalizacji statycznej szlifowania wałków, czyli do doboru charakterystyki ściernicy i początkowych warunków szlifowania.

W zakresie monitorowania procesu szlifowania, SSN stosowane są w detekcji pojedynczych zjawisk, takich jak drgania samowzbudne [CRLM-96] czy przypalenia na powierzchni szlifowanej [WWAW-01, LiCQ-97] lub jako narzędzie integracji wielu cech sygnałów pomiarowych i parametrów obróbki w ocenie stanu procesu [GrKu-94, HMYU-04, Inas-98, KaWI-00, Leża-98b, Leża-01a SuGr-00, WWAW-01].

Systemy regułowe znalazły zastosowanie w modelowaniu i sterowaniu procesów charakteryzujących się trudnością znalezienia ich adekwatnego opisu analitycznego [YaFi-95]. Systemy te mogą działać w oparciu o bazy wiedzy składające się z reguł ostrych, czyli niezawierających określenia stopnia niepewności co do ich prawdziwości, lub mogą być oparte o zbiory reguł wyprowadzonych z danych niepewnych, nieostrych, niepełnych, a nawet sprzecznych. Systemy o regułach ostrych popularnie nazywane są systemami ekspertowymi. Najpowszechniej spotykane systemy o regułach nieostrych opierają się o zastosowanie logiki rozmytej (ang. fuzzy logic) i stąd nazywane są systemami logiki rozmytej lub systemami fuzzy [LiKa-06]. Nową metodologią w zakresie budowy systemów regułowych jest zastosowanie teorii zbiorów przybliżonych [Pawl-82]. Łączy ona w sobie zalety systemów ekspertowych, systemów logiki rozmytej i sztucznych sieci neuronowych.

Zastosowanie systemów ekspertowych i systemów logiki rozmytej w nadzorowaniu procesu szlifowania jest przedmiotem wielu prac. Opisane w literaturze systemy ekspertowe mają głównie zastosowanie do doboru charakterystyki ściernicy oraz parametrów szlifowania i obciążania ściernicy [KoBS-89, LeBa-08, Leża-96a, MGFG-01, RoWe-00, TöPC-94]. Jednakże procesy technologiczne bardzo trudno poddają się opisowi za pomocą bazy wiedzy o skończonej liczbie reguł ostrych i dlatego znacznie szersze zastosowanie znalazły systemy logiki rozmytej [BTCH-98, Inas-98, TrZM-92, ViSh-98] oraz ich połączenia z SSN [ChKu-98, KaLK-03, Leża-98b, Leża-01a] lub algorytmami genetycznymi [SaIn-93]. Systemy logiki rozmytej w zastosowaniu do celów sterowania lub planowania posiadają tę zaletę, że wymagają znacznie mniejszej liczby reguł niż systemy ekspertowe [RoLM-96]. W zastosowaniu do diagnostyki lub nadzorowania, logika rozmyta może być wykorzystana do optymalizacji zbioru cech sygnałów i klasyfikacji stanu procesu [Leża-01a, LiCG-05].

Nową, stosunkowo jeszcze mało znaną metodą dokonywania skutecznej oceny stanu procesu na podstawie danych zarówno jakościowych, jak i ilościowych obarczonych niepewnością jest metoda generowania reguł decyzyjnych za pomocą teorii zbiorów przybliżonych [Pawl-82]. Na szczególną uwagę zasługuje najnowsza wersja tej metody, która dzięki wprowadzeniu relacji dominacji uwzględnia porządek preferencyjny w dziedzinie atrybutów opisujących stan procesu. Takie podejście do zbiorów przybliżonych określa się w skrócie jako DRSA (ang. Dominance-Based Rough Set Approach) [GrMS-01,

PaSI-07, Słow-00]. W przeciwieństwie do logiki rozmytej, nie wymaga ono dyskretyzacji dziedzin zmiennych systemu i wprowadzania dodatkowych założeń dotyczących danych np. odnośnie do rozkładu ich rozmytości. Natomiast równie dobrze jak sztuczne sieci neuronowe, toleruje niespójności w zbiorze danych i częściowy brak danych. Ponadto w DRSA wiedza odkrywana jest metodami uczenia maszynowego jedynie z danych w postaci przykładów realizacji procesu. Dotychczas zbiory przybliżone i ich zastosowania były przedmiotem zainteresowania blisko trzech tysięcy prac na całym świecie [PaSI-07]. W literaturze można już znaleźć szereg przykładów zastosowania klasycznej teorii zbiorów przybliżonych w diagnostyce systemów wytwarzania [HFTL-08, HoHu-04, HoLL-03, HuLP-05, MaCe-04, MCNA-06, Pase-06, PeSo-08, PiKR-09, PiKR-11, STQS-00, TsKE-05, XiLA-10, ZhKF-02]. Natomiast jeśli chodzi o wykorzystanie DRSA, to jedynie w pracy [PiKR-11] autorzy podali założenia do budowy systemu eksperckiego oceny procesów wytwarzania. Wynika to ze stosunkowo krótkiego czasu jaki upłynął od opublikowania tej metody.

Każda z opisanych metod budowy modeli procesu szlifowania ma swoje zalety i wady. Ich zestawienie pokazuje tabela 2.2.

Wielość możliwych do zastosowania metod modelowania rodzi pytanie o metodę najefektywniejszą. Przynajmniej częściową odpowiedzią może być praca [BTCH-98], w której zbudowano modele siły, naprężeń w warstwie wierzchniej i chropowatości powierzchni obrabianej dla tego samego procesu szlifowania za pomocą analizy regresji, SSN i logiki rozmytej. Porównanie wyników modelowania z wynikami badań doświadczalnych wykazało, że za pomocą każdej z tych metod można otrzymać model dobrze odwzorowujący wyniki procesu. Różne są jednak pracochłonność i właściwości użytkowe poszczególnych modeli, zgodnie z tym co pokazuje tabela 2.2. Nasuwa to wniosek, sugerowany również w [GrKu-94], że wybór metody modelowania poszczególnych zjawisk procesu nie jest najważniejszym problemem do rozwiązania przy tworzeniu systemów automatycznego nadzorowania procesów szlifowania. Zasadnicze znaczenie ma dobór optymalnego zestawu czujników wielkości procesowych i metod przetwarzania pochodzących z nich sygnałów pomiarowych zapewniających najbardziej reprezentatywny zestaw miar opisujących nadzorowane zjawiska. Rozwiązanie tego problemu jest tym trudniejsze, że jest specyficzne dla konkretnego zadania technologicznego.

Tabela 2.2. Zestawienie właściwości metod modelowania dla procesu szlifowania

Charakterystyka modelu	Rodzaj modelu		
	Autoregresja	SSN	Regułowy
Źródła wiedzy	Baza danych doświadczalnych, Ekspert	Baza danych doświadczalnych	Baza danych doświadczalnych, Ekspert
Ilość potrzebnych danych	Średnia	Duża	Średnia, mała dla systemów fuzzy
Rodzaj danych	Liczbowe	Liczbowe, symboliczne	Symboliczne, liczbowe
Jakość danych	Wysoka	Dopuszczalne braki w danych	Możliwe dane nieprecyzyjne i z brakami
Liczba wejść/wyjść	Raczej mała	Duża	Średnia, dowolna dla zbiorów przybliżonych
Pracochłonność budowy/uczenia	Średnia	Średnia	Średnia
Możliwość budowy on-line	Brak	Potencjalnie wysoka	Potencjalnie istnieje
Jakość odwzorowania	Dobra, zależy od jakości danych	Dobra, zależy od jakości danych	Dobra, zależy od jakości danych
Zdolność do uogólniania	Słaba	Duża	Duża
Aktualizacja	Łatwa	Łatwa	Trudna dla systemów ekspertowych i fuzzy
Zdolność do objaśniania	Dobra	Brak	Bardzo dobra
Możliwość adaptacji dla innych procesów	Mała	Średnia	Średnia

Metody sztucznej inteligencji mające zastosowanie w modelowaniu, czyli SSN i metody regułowe, są również używane do realizacji procedur klasyfikacji stanu procesu. Metody te stosowane są pojedynczo lub w połączeniu ze sobą, np. systemy neuro-fuzzy, dając efekt synergii [BAGH-06, Liao-10, LiLe-91, Mono-93, Mono-95, MMBW-96, TöFB-02]. Określane są wtedy jako systemy hybrydowe lub hierarchiczne [TJOD-10].

Przykładem systemu hybrydowego jest system doboru charakterystyki ściernicy i parametrów szlifowania opisany w [LiMR-97, LiRM-99, LRCM-99]. System ten, wykorzystując bazę danych o strukturze tablicy, ma możliwość działania w oparciu o cztery różne metody podejmowania decyzji. Podstawową metodą doboru parametrów jest wnioskowanie na przypadkach. Jeśli jednak w bazie nie ma odpowiedniego przypadku, to wykorzystywany jest system ekspertowy, który służy również do sugerowania wyjściowych parametrów poszukiwania. SSN w tym systemie służy do uściślenia doboru charakterystyki ściernicy.

M. Sakakura i I. Inasaki [SaIn-93] zaproponowali system symulacji wyników szlifowania oparty o wykorzystanie algorytmów genetycznych do optymalizacji bazy reguł rozmytych, która jest podstawą systemu wnioskowania rozmytego do przewidywania chropowatości i energii właściwej w szlifowaniu wałków. Następnie system ten stał się częścią systemu monitorowania i optymalizacji szlifowania wykorzystującego SSN do modelowania chropowatości i system rozmyty do optymalizacji cyklu szlifowania [Inas-95, Inas-98, KaWI-00].

S. Achichea i in. [ABBJ-02] zastosowali algorytmy genetyczne do automatycznego generowania optymalnej bazy wiedzy reguł rozmytych do monitorowania zużycia narzędzia podczas toczenia. Efektywność takiego systemu porównano z systemem rozmytym konstruowanym konwencjonalnie i systemem neuronowym. Otrzymano wyniki na porównywalnym poziomie dla wszystkich trzech systemów. Pozwoliło to jednak na wyeliminowanie eksperta z procesu budowy bazy wiedzy systemu rozmytego w zakresie jej optymalnego sformułowania.

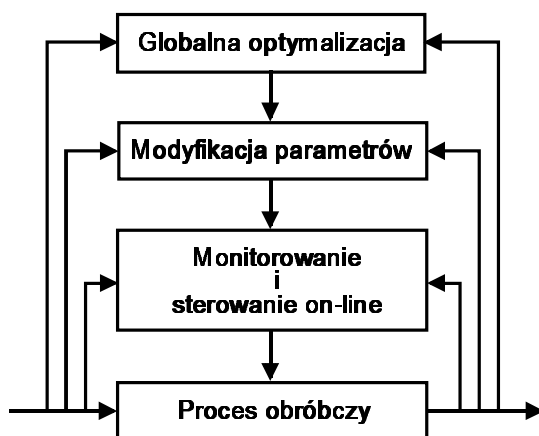
Hybrydowy system monitorowania stanu ściernicy podczas szlifowania kłowego wałków został również zaproponowany przez autora tej pracy [Leża-98, Leża-01a]. W systemie tym SSN została zastosowana do selekcji miar sygnałów pomiarowych najlepiej skorelowanych ze stanem ściernicy, a system neuro-fuzzy do estymacji tego stanu.

Zastosowanie metodologii opartej na SSN do modelowania procesu i jednej z form systemu regulowego do klasyfikacji jego stanu występuje również w innych pracach [DęUr-02, KaLK-03, PhOz-95]. Wynika to z podstawowych właściwości tych metod. Sieci neuronowe ze swoimi zdolnościami do uogólniania, integracji danych, tolerancji na dane zakłócone oraz możliwości uczenia się i funkcjonowania w trybie czasu rzeczywistego są szczególnie dobrym narzędziem do realizacji zadań modelowania związanych z przetwarzaniem danych liczbowych. Natomiast do realizacji zadań klasyfikacji stanu procesu i podejmowania decyzji sterujących, w których dominuje przetwarzanie danych symbolicznych, bardziej przydatne są systemy regulowe.

2.5. Idea inteligentnego systemu nadzorowania

Jak wspomniano wcześniej, automatyczne systemy nadzorowania są elementem kierunku rozwoju automatyzacji procesów technologicznych obróbki mechanicznej, która zmierza do tzw. produkcji bezobsługowej. Systemy takie powinny zatem, przynajmniej częściowo, przejąć rolę człowieka i pozwolić przesunąć jego udział na wyższy poziom związany z budową i eksploatacją takich systemów. System nadzorowania, który imitowałby postępowanie człowieka, będzie można określić mianem inteligentnego systemu nadzorowania (ISN) [Adam-95, AJKS-96, LeRa-93, Leża-96b, Malk-81, MaSa-80, SoDo-94, SoKo-95, SzCh-90, Szaf-88, West-94].

Pojęcie „inteligentna obrabiarka” pojawiło się pod koniec lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku. W roku 1980 K. Matsushima i K. Sata opublikowali pracę [MaSa-80], w której jako pierwsi, w oparciu o analizę funkcji procesu obróbkowego zaproponowali wielopoziomową strukturę układu sterowania takiej obrabiarki – rys. 2.11. Następnie autorzy sprawdzili swoją koncepcję w odniesieniu do sterowania adaptacyjnego tokarki. Na podstawie pomiarów drgań generowanych przez proces skrawania oraz siły i mocy skrawania, system rozpoznawał stan procesu, dokonywał doboru właściwych parametrów skrawania, modyfikował parametry algorytmu sterowania adaptacyjnego oraz uczył się doboru narzędzi. Praca ta wytyczyła główne zagadnienia badawcze w zakresie budowy inteligentnych systemów obróbkowych. Biorąc pod uwagę ówczesne możliwości obliczeniowe komputerów, wyniki tej pracy były bardzo zachęcające do kontynuowania tego kierunku rozwoju automatyzacji w technologii maszyn.



Rys. 2.11. Wielopoziomowa struktura układu sterowania obrabiarki inteligentnej [MaSa-80] (tłumaczenie własne)

Systemy inteligentne integrują zastosowanie odpowiednich układów pomiarowych, układów przetwarzania informacji oraz układów sterowania. W związku z tym prace badawcze zmierzające do budowy takich systemów zostały skierowane na wszystkie te elementy i ich integrację.

W latach 80. i na początku 90. opublikowano szereg prac, których celem było stworzenie podstaw do realizacji systemów inteligentnych. Prace te dotyczyły głównie poszukiwania odpowiednich miar opisujących stan procesu i związanych z tym metod przetwarzania sygnałów pomiarowych [BaRW-92, DoBl-90, DoCa-84, DoPa-85, Dorn-90b, EmKa-87, Inas-85, JeKo-96, Jemi-92, KaDo-82, LeRa-93, Lido-89] oraz wykorzystania metod sztucznej inteligencji do nadzorowania procesów [ChDo-89, ChDZ-90, Dorn-90a, RaDo-90, SaIn-92, SaIn-93, Śpie-91, TWKK-88,]. Praktyczne wykorzystanie tych prac napotkało barierę opracowania adekwatnych modeli procesu szlifowania wynikającą z ówczesnych możliwości w zakresie technik pomiarowych oraz obliczeniowych.

Dopiero w latach 90. osiągnięcia w dziedzinie mikroelektroniki i upowszechnienie się technologii komputerowych umożliwiły dalszy postęp w zakresie opracowania takich systemów. Pojawiły się przede wszystkim prace z zakresu monitorowania ostrza skrawającego, których przegląd i swoiste podsumowanie dają prace [BDIK-95, AJKS-96]. Na uwagę zasługuje praca L. Monostori'ego [Mono-95], w której przedstawiono hierarchiczny system planowania i sterowania procesem, przetestowany na operacjach toczenia i frezowania. System ten wykorzystuje sieć neuronową do modelowania i sterowania procesów oraz system ekspercki do ich planowania. Najważniejszą jego cechą jest zintegrowanie wszystkich elementów oprogramowania, co pozwala na ciągłą, dynamiczną wymianę informacji między nimi.

Wdrożenie systemów inteligentnych jest szczególnie uzasadnione w przypadku procesów szlifowania. Pomimo istotnego postępu w zakresie technologii szlifowania osiągniętego w ciągu ostatnich lat, szczególnie w zakresie napędów i sterowania szlifierek oraz w zakresie budowy ściernic, parametry jakości przedmiotu po szlifowaniu ciągle w dużym stopniu zależą od doświadczenia i umiejętności szlifierza. Z tego względu idea inteligentnego systemu szlifowania, w którym rola szlifierza byłaby zredukowana do minimum, może być skutecznym rozwiązaniem problemów efektywnego automatycznego nadzorowania procesu szlifowania. W efekcie ukazało się szereg publikacji poświęconych wdrożeniu ISN dla procesów szlifowania. W różnych aspektach zostały one omówione w poprzednich częściach tego rozdziału.

Kompleksowe podejście do problemu ISN szlifowania prezentuje w swoich pracach I. Inasaki [Inas-91, Inas-95, Inas-98, KaWI-00, SaIn-92, SaIn-93]. W proponowanym przez niego systemie moduł diagnostyki ściernicy współpracuje z modułem optymalizacji cyklu i tworzoną dynamicznie bazą wiedzy. Kryterium optymalizacji cyklu jest minimalny czas szlifowania przy ograniczeniu ze strony parametrów jakości szlifowanej powierzchni, przy czym optymalizacja ta nie jest wykonywana w trybie on-line, czyli nie ma charakteru

sterowania adaptacyjnego. Baza danych pozwala na dobór początkowych parametrów szlifowania i parametrów obciążania ściernicy, bez możliwości doboru charakterystyki ściernicy. Przy jej budowie wykorzystano regułowy system rozmyty, którego parametry optymalizowane są za pomocą algorytmu genetycznego. Zaletą takiego podejścia jest jego prostota i jawna reprezentacja wiedzy, natomiast wadą – nienajwyższa efektywność i trudność dynamicznej modyfikacji.

Konsekwencją w poszukiwaniu możliwie najlepszych rozwiązań w zakresie ISN szlifowania wykazał się T.W. Liao i in. w szeregu prac [LHQB-06, LTQB-07, LTQB-08, Liao-10]. Ograniczeniem tych poszukiwań jest to, że wykorzystywany jest w nich wyłącznie sygnał EA (podrozdział 2.3.4).

Na podstawie dotychczasowych doświadczeń można sformułować zalecenia dla systemów inteligentnych. System inteligentny powinien umożliwiać [LeLa-01, LeLa-03, MMBW-96, Mono-95, TöFB-02]:

- integrację danych pochodzących ze wszystkich możliwych źródeł, tj. danych pochodzących z układów pomiarowych, układu sterowania adaptacyjnego i CNC, z bazy wiedzy o systemie, a także danych pochodzących od eksperta,
- działanie w oparciu o dane doświadczalne charakteryzujące się pewnym stopniem niepewności lub nieostrości, dane niepełne, a nawet sprzeczne,
- wiarygodną detekcję zakłóceń przebiegu procesu szlifowania, a w szczególności diagnostykę zużycia ściernicy,
- optymalizację cyklu szlifowania ze względu na parametry jakości przedmiotu lub czas szlifowania,
- inicjowanie odpowiedniego działania korygującego w odpowiedzi na wykryte zakłócenia przebiegu procesu,
- samoczynne uczenie i dostrajanie się systemu odpowiednio do stanu wiedzy o procesie uzyskanej podczas działania systemu.

W systemach takich potrzeba szybkiej i wiarygodnej diagnostyki oraz efektywnego sterowania procesu prowadzi do stosowania metod z obszaru metod pomiarowych, zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów, modelowania zjawisk, komputerowego wspomaganie podejmowania decyzji [BAGH-06, LeRa-93, Leża-03, MMBW-96, Mono-95, RYIM-94, UMMK-01] oraz standaryzacji w zakresie reprezentacji i przesyłania danych [HoPr-03].

Z punktu widzenia przetwarzania informacji, system inteligentny powinien posiadać zdolność do [Mono-95]:

- działania w systemie czasu rzeczywistego (on-line),
- uczenia się, modyfikowania, objaśniania oraz jawnej reprezentacji posiadanej wiedzy,
- uczenia się i przetwarzania danych zarówno symbolicznych, jak i numerycznych z uwzględnieniem stopnia niepewności pozyskanej wiedzy.

W zakresie rozwiązań sprzętowych ISN powinien posiadać otwartą strukturę komputerową charakteryzującą się modularnością, łatwością wymiany informacji pomiędzy poszczególnymi modułami oraz elastycznością [HoPr-03,

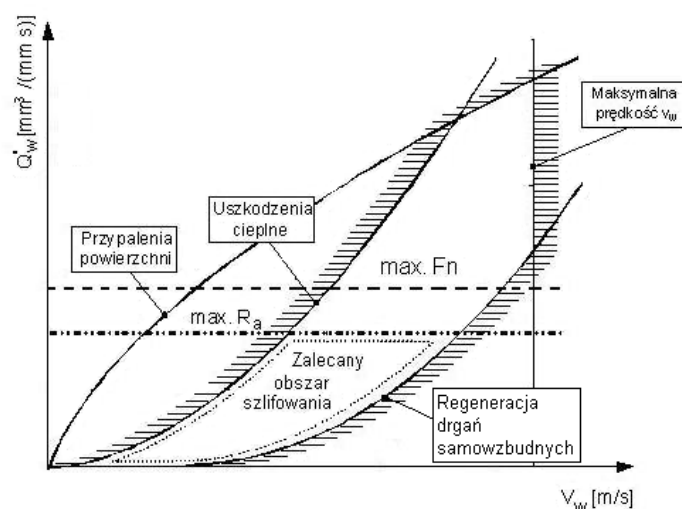
Szaf-94, Szaf-96, TöFB-02, TJOD-10]. Z punktu widzenia użytkownika istotna jest łatwość obsługi systemu. Dlatego należy zwrócić uwagę na stworzenie odpowiedniego interfejsu użytkownika pozwalającego na integrację procedur pomiarowych, diagnostycznych i optymalizacyjnych ze standardowymi procedurami CNC [HoPr-03, KaWI-00]. Podejściu takiemu sprzyja wprowadzony ostatnio przez Association for Manufacturing Technology (USA) standard w zakresie oprogramowania dla wymiany informacji i jej używania przez różne elementy systemów wytwarzania pod nazwą MTConnect [DBVC-09, TJOD-10]. Standard ten oparty jest na idei interoperatywności (ang. interoperability) w odniesieniu do oprogramowania i sprzętu, która w przeciwieństwie do idei standardu otwartego (ang. open standard) nie wymaga standaryzacji już na etapie projektowania (*ab initio*) systemu, lecz umożliwia wymianę informacji pomiędzy produktami powstałymi niezależnie (*post facto*). Protokół MTConnect definiuje wspólny język i strukturę komunikacji elementów systemu wytwarzania, wykorzystując standaryzowane interfejsy, jednocześnie nie naruszając funkcji poszczególnych elementów i standardu danych. Wykorzystuje w tym celu XML (ang. eXtensible Markup Language) – uniwersalny język formalny przeznaczony do reprezentowania różnych danych w strukturalizowany sposób.

Również w Europie, w ramach kolejnych Programów Ramowych Unii Europejskiej prowadzone były projekty zmierzające do upowszechnienia technologii inteligentnych w systemach wytwarzania. Sieć Doskonałości “Innovative Production Machines and Systems - I*PROMS” w latach 2004-2009 i “Adaptive Control of Manufacturing Processes for a New Generation of Jet Engine Components – ACCENT” w latach 2008-2010 to przykłady takich projektów.

3. TEORETYCZNO-DOŚWIADCZALNE PODSTAWY AUTOMATYCZNEGO NADZOROWANIA PROCESU SZLIFOWANIA

3.1. Obszar akceptowalnego przebiegu procesu szlifowania

Wielkości nastawne procesu szlifowania wpływają w sposób przeciwny zarówno na wyniki technologiczne, jak i ekonomiczne procesu szlifowania. Jednocześnie proces szlifowania podlega szeregu ograniczeniom, które obrazowo można przedstawić na wykresie właściwej wydajności objętościowej szlifowania w funkcji prędkości obwodowej przedmiotu obrabianego – rys. 3.1.



Rys. 3.1. Akceptowalny obszar szlifowania

Dla określonego zestawu stałych czynników wejściowych procesu szlifowania głębokiego, zakładając stałą prędkość ściernicy, istnieje tzw. akceptowalny obszar szlifowania [MaSP-75], który na rys. 3.1 ograniczony jest linią kropkowaną. Obszar ten ograniczony jest możliwością powstania przypaleń i innych uszkodzeń cieplnych powierzchni obrabianej, utraty stabilności procesu spowodowanej efektem regeneracji drgań samowzbudnych oraz, co wynika wyłącznie z warunków technicznych, maksymalną prędkością przedmiotu. Ponadto, akceptowalny obszar szlifowania zawężony jest przez nałożenie ograniczeń wynikających z dopuszczalnej siły normalnej lub chropowatości powierzchni. Dowolny punkt wewnątrz tego obszaru wyznacza parametry nastawne procesu spełniające wszystkie ograniczenia.

Rys. 3.1 przedstawia akceptowalny obszar szlifowania dla stacjonarnych warunków szlifowania, w tym dla ustalonej zdolności skrawnej ściernicy. Jednakże proces szlifowania ma charakter losowy i niestacjonarny, co jest związane w głównej mierze z ciągłą zmianą zdolności skrawnej ściernicy o takim samym charakterze [Hamr-90, Kaca-88, Kloc-09, MaGu-08]. Skutkuje to przemieszczaniem się granic zalecanego obszaru szlifowania w ramach pojedynczego okresu trwałości ściernicy, a nawet pojedynczego cyklu pracy. Dla większości procesów szlifowania zakłócenia spowodowane tymi zmianami powodują zmiany warunków pracy w dość szerokim zakresie. Wobec losowości tych zakłóceń, 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 ograniczający ten stan.

3.2. Znaczenie stanu zużycia ściernicy

Procesowi szlifowania towarzyszy zawsze zużywanie się ściernicy, czyli utrata jej wartości użytkowych rozumianych jako zdolność do usuwania nadmiaru szlifierskiego i kształtowania pożądanego stanu warstwy wierzchniej przedmiotu szlifowanego [Kozi-96]. Dokładniej mówiąc, w trakcie szlifowania ściernica traci tę część swoich właściwości, która związana jest z makro- i mikrogeometrią jej czynnej powierzchni. Właściwości te są jednak odtwarzane w kolejnych procesach obciążania. Pozostałe cechy ściernicy, odnoszące się do jej charakterystyki technicznej, określane są w procesie produkcyjnym i pozostają stałe w ciągu całego okresu jej eksploatacji.

Z punktu widzenia automatyzacji szlifowania, zagadnienie wiarygodnego opisu zmian w zdolności skrawnej ściernicy zachodzących w następstwie użycia jej w procesie szlifowania ma zasadnicze znaczenie. Poszukiwanie wiarygodnych modeli zużycia ściernicy od wielu lat jest jednym z głównych nurtów prac badawczych dotyczących procesu szlifowania. Dotychczas opracowane i prezentowane w literaturze modele różnią się zarówno pod względem postaci, jak i stosowanych zmiennych [Bork-90, Kozi-96, Leża-01a, Liao-10, Urba-02, WHKK-11].

Mikrogeometria czynnej powierzchni ściernicy (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 wyrywaniem ziaren i erozją spoiwa, a także z zalepianiem porów powietrza produktami szlifowania. 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, czyli zmiany w jej makrogeometrii.

Podczas szlifowania równolegle zachodzą oba wymienione procesy, tzn. makro- i mikrozużycia ściernicy. Jednak zwykle jeden z nich przeważa i wówczas ten rodzaj zużycia decyduje o okresie trwałości ściernicy.

3.2.1. Makrozużycie ściernicy

Makrozużycie ściernicy może być opisane wieloma wskaźnikami [MaGu-08, OcPo-86, WHKK-11]. Wskaźniki związane ze zużyciem objętościowym ściernicy są istotne z punktu widzenia kosztów szlifowania. Natomiast dla osiągnięcia dokładności wymiarowo-kształtowej przedmiotu szlifowanego oraz dla zapewnienia stabilności procesu istotne znaczenie mają wskaźniki związane ze zużyciem promieniowym. W szlifowaniu wgłębnym zużycie promieniowe jest w naturalny sposób kompensowane przez dosuw ściernicy i nie prowadzi do utraty dokładności wymiarowej. Zużycie promieniowe ściernicy ma znacznie większe znaczenie dla osiągnięcia dokładności wymiarowej w przypadku szlifowania wzdłużnego, kiedy ściernica zużywa się nierównomiernie wzdłuż tworzącej, przyjmując od strony krawędzi szlifującej kształt stożkowaty [Leża-01c, Leża-01d, MaGu-08, Ocz-75, Shaw-72, Verk-81].

Szczególną formą zużycia promieniowego ściernicy, mającą istotne znaczenie stabilności procesu szlifowania, jest rozwój falistości na obwodzie ściernicy. Falistość ściernicy, obok falistości przedmiotu, jest podstawową przyczyną regeneracji drgań samowzbudnych występujących w szlifowaniu walcowym, mających bezpośredni wpływ na jakość powierzchni szlifowanego przedmiotu [InKL-01]. Rozwój drgań samowzbudnych może prowadzić do utraty stabilności procesu i uszkodzenia ściernicy lub przedmiotu. Z tego względu powinien być podstawowym kryterium oceny stopnia zużycia ściernicy. Ponieważ ta forma zużywania się ściernicy ma ścisły związek ze stabilnością procesu szlifowania, to zagadnienie to jest omówione w rozdziale 3.4 poświęconym zagadnieniom dynamiki procesu szlifowania wgłębnego kłowego.

3.2.2. Mikrozużycie ściernicy

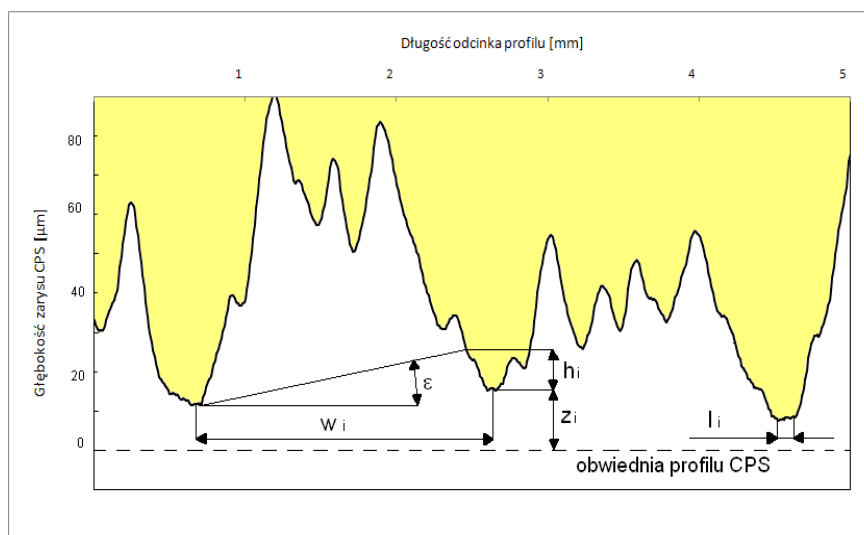
Parametry CPS wraz z parametrami ruchu ściernicy i przedmiotu obrabianego kształtują warunki styku ściernicy z przedmiotem, które decydują o prawidłowości przebiegu procesu szlifowania. Ponieważ dla danej operacji szlifowania warunki ruchu są stałe, to decydują parametry CPS.

Mikrogeometria CPS jest opisywana wieloma parametrami. A. Koziarski [Kozi-96] podaje listę 21 różnych parametrów spotykanych w literaturze,

z których jego zdaniem na rekomendację zasługują parametry związane z opisem rozkładów gęstości krawędzi skrawających i równoważnej grubości wiórów, wielkością powierzchni starcia ziaren oraz z funkcją gęstości widmowej profilu CPS. Z punktu widzenia systemów nadzorowania istotne są te parametry, za pomocą których można ocenić zdolność skrawną ściernicy i jej zmiany jakie wystąpiły w następstwie eksploatacji ściernicy. Potencjał użytkowy CPS [Kozi-96, Urba-02] może być opisany za pomocą następującego zestawu zbiorów parametrów CPS:

- w_i – odległości pomiędzy ostrzami skutecznymi,
- h_i – grubości wiórów przypadające na skuteczne ostrza,
- z_i – głębokości zalegania skutecznych ostrzy, czyli odległości ich wierzchołków od linii obwiedni CPS,
- l_i – długości styku skutecznych ostrzy z przedmiotem obrabianym wynikające ze ściernego zużycia ostrza,
- ε – kąt promieniowego wnikania materiału obrabianego w przestrzeń roboczą ściernicy, który zależy od zastosowanych parametrów nastawnych procesu i wartości równoważnej średnicy ściernicy.

Wielkości te ilustruje rys. 3.2.

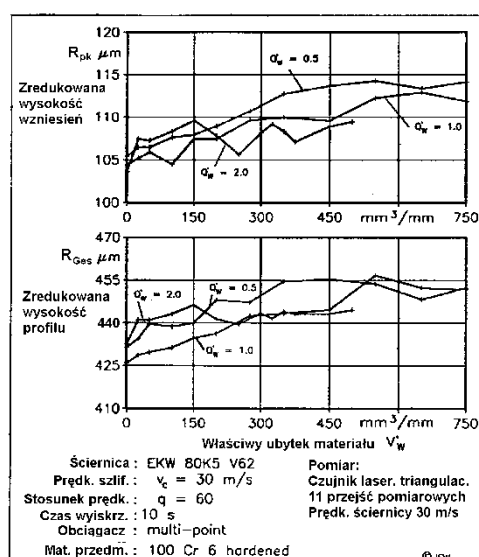


Rys. 3.2. Parametry opisu mikrogeometrii CPS

Metody opisu właściwości eksploatacyjnych ściernicy oparte na pomiarze zarysu profilu CPS i wyznaczaniu opisu rozkładów gęstości jego parametrów rozwijał konsekwentnie w swoich badaniach M. Urbaniak [Urba-02]. Interpretacja rozkładów statystycznych wielu parametrów używanych w tych metodach do analizy ich wpływu na właściwości eksploatacyjne ściernicy

następcza jednak pewne trudności i może prowadzić do mylnych wniosków. Ponadto M. Urbaniak nie badał przydatności tych metod do określania stanu zużycia ściernicy. Istnieje zatem potrzeba znalezienia takiej metody interpretacji profilogramu, która uwzględniając losowy rozkład stereometrii CPS byłaby bardziej „syntetyczna” w opisie właściwości CPS, szybsza i łatwiejsza w realizacji oraz zapewniała większą porównywalność wyników. Biorąc pod uwagę możliwości mikroprocesorowych systemów przetwarzania danych, taką metodą może być metoda opisu geometrii profilogramu CPS za pomocą parametrów krzywej udziału materiałowego [BrWe-92, WHKK-11].

Metoda ta polega na wyznaczeniu parametrów liniowego przedstawienia krzywej udziału materiałowego (krzywej Abbotta-Firestone’a) opisującej profil powierzchni CPS przez powiększanie się udziału materiałowego wraz ze wzrostem głębokości. Parametry te są pomocne do oceny praktycznego zachowania się powierzchni poddanych wysokim obciążeniom mechanicznym wówczas, kiedy krzywa przybiera kształt litery „S” (PN EN ISO 13565-2: 1999). W przypadku badania czynnych powierzchni ściernic, warunki te są praktycznie zawsze zachowane. Wykorzystanie opisu mikrogeometrii CPS za pomocą krzywej udziału materiałowego do określania zdolności skrawnej ściernicy po raz pierwszy zaproponowano w pracy [BrWe-92]. Przykładowe wyniki uzyskane w tej pracy pokazuje rys. 3.3. Wykorzystanie wyników pracy autora tej pracy [LeLa-04] w tym zakresie przedstawiono w rozdziale 4.3.



Rys. 3.3. Wybrane parametry liniowego opisu krzywej udziału materiałowego w funkcji właściwej wydajności objętościowej Q'_w i właściwego ubytku materiału szlifowanego V'_w [BrWe-92] (tłumaczenie własne)

Ogólnie można stwierdzić, że przydatność wszystkich metod bezpośredniego opisu mikrogeometrii CPS do automatycznego nadzorowania szlifowania obarczona jest szeregiem niedoskonałości wynikających z istoty profilografowania, takich jak niewystarczająca długość odcinka pomiarowego, wątpliwości w zakresie rozdzielczości odwzorowania czy brak rozróżnienia między ziarnami a mostkami spoiwa [Kozi-96, Urba-02, WHKK-11]. Podstawową wadą są jednak bardzo ograniczone możliwości wykonania pomiaru w warunkach przemysłowych. Nawet w przypadku zastosowania profilometru laserowego [BrWe-92], konieczne jest zwolnienie prędkości obwodowej ściernicy do ok. 20 m/s i zapewnienie dotarcia wiązki lasera do czystej czynnej powierzchni ściernicy. Mimo tych wad, profilogram jest najobszerniejszym źródłem informacji na temat mikrogeometrii CPS i może być wykorzystany w warunkach laboratoryjnych do celów porównawczych (rozdział 4.3).

Dodatkową wadą wyznaczania parametrów mikrogeometrii CPS jest niejawna zależność pomiędzy tymi parametrami a wynikami szlifowania, które są podstawą do ostatecznej oceny procesu i mogą stanowić kryteria oceny ilościowej przesądzające o zakwalifikowaniu ściernicy do ponownego obciążania. Pozostaje zatem pośrednia ocena stanu CPS na podstawie mierzalnych w czasie szlifowania sygnałów pomiarowych parametrów stanu procesu skorelowanych ze zdolnością skrawną ściernicy. Takie podejście wymaga określenia zależności jakie występują pomiędzy mierzalnymi parametrami stanu procesu a parametrami CPS.

Ważnym parametrem stanu procesu, powszechnie uważanym za dobrze skorelowany ze zdolnością skrawną ściernicy, jest siła szlifowania oraz wszystkie wielkości od niej pochodne.

Podstawą rozważenia zależności siły szlifowania od parametrów mikrogeometrii CPS mogą być istniejące modele siły wynikające z teoretycznej i doświadczalnej analizy warunków pracy pojedynczego ziarna [Hamr-90, LiJi-80, MaCo-71, OcPo-86, Wern-71]. Najbardziej przydatnym z tych modeli jest model opracowany przez L. Lichuna i F. Jizai [LiJi-80]. W modelu tym połączyli oni metodologię określania siły szlifowania zaproponowaną przez G. Wernera [Wern-71] z wynikami doświadczalnymi S. Malkina i N. Cooka [MaCo-71] w zakresie podziału składowych siły szlifowania na składowe związane z tworzeniem wióra oraz składowe związane z tarciem ziaren o powierzchnię przedmiotu i wiórów. Punktem wyjścia jest założenie, że składowa normalna F_{ng} i styczna F_{tg} siły szlifowania pojedynczym ziarnem mogą być określone następującymi zależnościami:

$$F_{ng} = F_{ngc} + F_{ngf} \quad (3.1)$$

$$F_{tg} = F_{tgc} + F_{tgf} \quad (3.2)$$

gdzie: F_{ngc} – część składowej normalnej przypadająca na tworzenie wióra,

F_{ngf} – część składowej normalnej przypadająca na pokonanie tarcia,

F_{tgc} – część składowej stycznej przypadająca na tworzenie wióra,

F_{tgf} – część składowej stycznej przypadająca na pokonanie tarcia.

Część składowej normalnej przypadająca na tworzenie wióra, przez analogię do skrawania podczas toczenia, może być określona jako iloczyn właściwego oporu skrawania k_1 i maksymalnego przekroju wióra Q_{max} . Z zależności geometrycznych wynika, że wiór tworzony przez pojedyncze ziarno ma w kierunku obwodowym przekrój zbliżony do trójkąta. A zatem jego przekrój zmienia się, przyjmując wartość maksymalną Q_{max} pod koniec odcinka styku ziarna z przedmiotem obrabianym. W przypadku składowej stycznej, ta część siły jest powiązana ze składową normalną współczynnikiem φ zależnym od kąta wierzchołkowego ziarna.

Część składowej normalnej przypadająca na pokonanie tarcia może być przedstawiona jako iloczyn powierzchni starcia ostrza δ i średniego nacisku jednostkowego na tej powierzchni $\bar{p}$. Ta część składowej stycznej jest równa iloczynowi tych samych składników i współczynnika tarcia μ pomiędzy powierzchnią starcia ostrza a materiałem obrabianym.

Po podstawieniu powyższych zależności, równania (3.1) i (3.2) przyjmą następującą postać:

$$F_{ng} = k_1 Q_{max} + \delta \bar{p} \quad (3.3)$$

$$F_{tg} = \varphi k_1 Q_{max} + \mu \delta \bar{p} \quad (3.4)$$

Właściwa składowa normalna F'_n i styczna F'_t siły szlifowania są równe sumie odpowiednich składowych działających na wszystkich chwilowo skutecznych ziarnach w strefie styku ściernicy z przedmiotem. A zatem właściwa siła przypadająca na formowanie wióra jest proporcjonalna do wartości sumy wszystkich przekrojów wióra ostrzy chwilowo skutecznych odniesionych do jednostki szerokości szlifowania $Q'_{ch,całk}$. Wychodząc z zależności podanych przez Wernera [Wern-71], można ustalić, że jej wartość jest równa równoważnej grubości wióra h_{eq} :

$$Q'_{ch,całk} = \frac{v_w}{v_s} a = h_{eq} \quad (3.5)$$

Natomiast właściwa siła przypadająca na pokonanie tarcia jest równa iloczynowi powierzchni starcia pojedynczego ostrza δ i średniego nacisku jednostkowego na tej powierzchni $\bar{p}$ oraz liczby chwilowo skutecznych ziaren N_{ch} . Ta ostatnia wielkość jest określona następującą zależnością [Wern-71]:

$$N_{ch} = \frac{A_n}{1+\alpha} (C_{st1})^\beta \left(\frac{v_w}{v_s} \right)^\alpha a^{\frac{1+\alpha}{2}} (D_{eq})^{\frac{1-\alpha}{2}} \quad (3.6)$$

gdzie: A_n – współczynnik proporcjonalności zależny od kształtu ostrza i współczynnika α ,

α, β – współczynniki zależne od rozkładu przestrzennego ziaren w przestrzeni CPS, które mogą zmieniać swe wartości w zakresie: $\alpha = 0 \div 0,66$; $\beta = 0,5 \div 0,66$ [LiJi-80],

C_{st1} – gęstość ostrzy statycznych na głębokości $z = 1 \text{ mm}$,

D_{eq} – równoważna średnica ściernicy,

v_w – prędkość obwodowa przedmiotu szlifowanego,

v_s – prędkość obwodowa ściernicy.

Po uwzględnieniu zależności (3.5) i (3.6), wyrażenia określające składowe właściwej siły szlifowania przyjmą ostatecznie następującą postać:

$$F'_n = k_1 h_{eq} + \delta \bar{p} \frac{A_n}{1+\alpha} (C_{st1})^\beta (aD_{eq})^{\frac{1-\alpha}{2}} (h_{eq})^\alpha \quad (3.7)$$

$$F'_t = \varphi k_1 h_{eq} + \mu \delta \bar{p} \frac{A_n}{1+\alpha} (C_{st1})^\beta (aD_{eq})^{\frac{1-\alpha}{2}} (h_{eq})^\alpha \quad (3.8)$$

Analiza zależności (3.6) i (3.8) pozwala ocenić wpływ różnych wielkości na wartości składowych siły szlifowania, w tym parametrów opisujących mikroteometrię CPS, pokazanych na rys. 3.3.

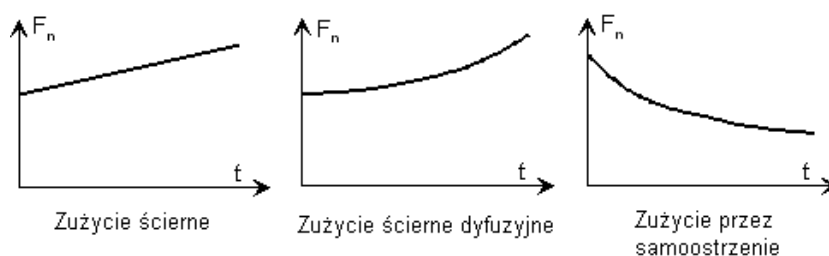
Po pierwsze należy zauważyć, że tylko te części obu składowych siły szlifowania, które przypadają na formowania wióra nie zależą bezpośrednio od parametrów mikroteometrii CPS. Proporcjonalnie zależą one od właściwości materiału obrabianego reprezentowanych przez współczynnik właściwego oporu skrawania k_1 , od wielkości nastawnych, które decydują o równoważnej grubości wióra h_{eq} , a w przypadku składowej stycznej, również od współczynnika φ , który jest funkcją kąta wierzchołkowego ziaren ściernicy. Wszystkie te wielkości można przyjąć jako niezmiennie w okresie trwałości ściernicy.

Inaczej zależności te kształtują się dla części składowych siły szlifowania przypadających na pokonanie sił tarcia. Jak wynika z badań G. Wernera [Wern-71] oraz L. Lichuna i F. Jizai [LiJi-80], średni nacisk jednostkowy na powierzchni starcia ziaren $\bar{p}$ i współczynnik tarcia μ są wielkościami stałymi i zależą głównie od właściwości materiału obrabianego i ściernicy. Również równoważna średnica ściernicy i wielkości nastawne mają ograniczony wpływ na wartość tych składowych ze względu na zależność w potęgze wyraźnie mniejszej od jedności. Natomiast w dużym stopniu o wartości tych składowych decydują parametry związane ze stanem zużycia ściernicy. Te parametry to:

1. Powierzchnia starcia ostrza δ . Jest to parametr, którego odpowiednikiem w liniowym przedstawieniu zarysu profilu CPS (rys. 3.2) jest długość styku czynnych ostrzy z przedmiotem obrabianym, wynikająca ze ściernego zużycia ostrza l_i . Jego zmiana powoduje wprost proporcjonalną zmianę siły szlifowania przeznaczonej na pokonanie tarcia.
2. Doświadczalnie ustalone współczynniki α , β , A_n zależne od rozkładu przestrzennego ziaren w przestrzeni CPS, a zatem od odległości pomiędzy ostrzami skutecznymi w_i i głębokości zalegania skutecznych ostrzy z_i (rys. 3.3). Charakter ich oddziaływania na wartość siły jest bardzo trudny do ustalenia ze względu na stopień uwikłania w zależnościach (3.7) i (3.8). Jednakże zakres ich zmienności jest znaczny, stąd ich wpływ jest istotny.

Przeprowadzona analiza pokazuje, że parametry mikrogeometrii CPS 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 pęknięcia ziaren, czyli pojawienia się zjawiska samoostrzenia ściernicy. Każdemu mechanizmowi zużycia ściernicy odpowiada jednak inny przebieg składowych siły szlifowania. Pokazują to z zależności (3.7) i (3.8). Ścieranie się wierzchołków ziaren powoduje wzrost powierzchni starcia ostrzy δ , co decyduje o wzroście wartości składowych siły szlifowania. W przypadku wykruszania i pęknięcia ziaren, sumaryczna powierzchnia starcia ostrzy maleje, nowe, ostre ziarna stają się skuteczne w przestrzeni CPS, co w konsekwencji przyczynia się do spadku siły szlifowania. Opracowane przez Hamrola [Hamr-90] modele składowej normalnej siły dla zużycia ściernego i zużycia przez samoostrzenie potwierdzają takie zależności – rys. 3.4.



Rys. 3.4. Zmiany składowej normalnej siły szlifowania w okresie trwałości ściernicy w zależności od mechanizmu zużycia ściernicy [Hamr-90]

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.

Wnioskowanie zatem o stanie zdolności skrawnej ściernicy nie może odbywać się jedynie na podstawie pomiaru składowych siły szlifowania. W kolejnych cyklach roboczych w okresie trwałości ściernicy wartości poszczególnych składowych siły mogą losowo zmieniać swoją wartość w zależności od przewagi określonego mechanizmu zużycia ściernicy i wpływu innych zjawisk towarzyszących procesowi szlifowania. Konieczna jest zatem ocena na podstawie większej liczby symptomów uzyskanych z różnych sygnałów pomiarowych dla uzyskania efektu synergii informacji.

Wyniki wielu badań doświadczalnych wskazują (rozdział 2.3.4), że oprócz siły szlifowania, wybrane cechy sygnału emisji akustycznej są skorelowane z mikrogeometrią ściernicy. Brak jest jednak ustaleń jaki jest ilościowy wkład poszczególnych źródeł emisji akustycznej podczas szlifowania w ogólną wartość energii tego sygnału. Jedynie D. Dornfeld w jednej ze swych wczesnych prac [DoKa-80] rozważa teoretyczne podstawy zjawiska emisji akustycznej w odniesieniu do skrawania metali. Teoria ta zakłada, że sygnał emisji akustycznej w skrawaniu jest ciągły, chociaż składa się z pulsacji generowanych przez różne zjawiska fizyczne zachodzące w strefie skrawania. Ustalono bowiem, że czas trwania poszczególnych pulsacji o określonej amplitudzie jest większy od średniego odstępu czasowego między takimi pulsacjami. Nie likwiduje to jednak największego problemu dla interpretacji tego sygnału jakim jest jego losowość. W rzeczywistości sygnał emisji akustycznej jest nieokresowy, zawiera wiele, często krótkotrwałych, składowych częstotliwościowych i nie daje się opisać żadną nieunikłą matematyczną zależnością.

W pracy [DoKa-80] wyprowadzono i zweryfikowano doświadczalnie model energii sygnału emisji akustycznej dla skrawania ortogonalnego, według którego jest ona wprost proporcjonalna do oporu skrawania, szybkości odkształcenia postaciowego w strefie tworzenia wióra i objętości tej strefy. W modelu tym uwzględniono tylko odkształcenie plastyczne w strefie tworzenia wióra jako istotne źródło emisji akustycznej. Tymczasem w szlifowaniu, ze względu na odmienny od skrawania ortogonalnego proces tworzenia wióra, oprócz odkształcenia plastycznego istotnym źródłem emisji akustycznej jest również tarcie. Z tego powodu, przeniesienie tego modelu na przypadek szlifowania pojedynczym ziarnem nie jest możliwe. Pozostaje zatem modelowanie stanu mikrogeometrii CPS jako funkcji różnych miar sygnału emisji akustycznej tylko metodami empirycznymi.

Kolejną grupą wielkości zależnych od mikrogeometrii CPS są parametry warstwy wierzchniej i struktury geometrycznej powierzchni szlifowanej. Charakter tych zależności może być określony ogólną prawidłowością, która mówi, że większe grubości wiórów i spadek liczności skutecznych ostrzy powodują wzrost chropowatości powierzchni szlifowanej i zmniejszenie wartości maksymalnych naprężeń własnych w warstwie wierzchniej [Kozi-96, Inas-98, Urba-02]. Podobnie jak w przypadku siły szlifowania i emisji akustycznej, zależności te mają charakter pośredni i są określane na drodze empirycznej. Dodatkową trudnością jest fakt, że parametry warstwy wierzchniej i praktycznie również chropowatości są niemierzalne on-line.

3.3. Znaczenie zjawisk dynamicznych

Zjawiska dynamiczne zachodzące podczas szlifowania mają dwa podstawowe źródła – są to drgania obcowzbudne i samowzbudne.

Źródłem drgań obcowzbudnych są przenoszone przez podłoże drgania innych urządzeń i maszyn pracujących w sąsiedztwie oraz nieuniknione błędy wykonania i montażu poruszających się elementów własnych mechanizmów szlifierki. Drganie te określa się jako obcowzbudne lub wymuszone, ponieważ ich źródła znajdują się poza procesem szlifowania. Z punktu widzenia nadzorowania procesu szlifowania, ten rodzaj drgań jest zakłóceniem, ale nie stanowi istotnego źródła informacji, ponieważ powodowane przez nie zjawiska dynamiczne są niezależne od procesu i mogą być diagnozowane w czasie biegu jałowego szlifierki [Hamr-90, InKL-01, TöFB-02].

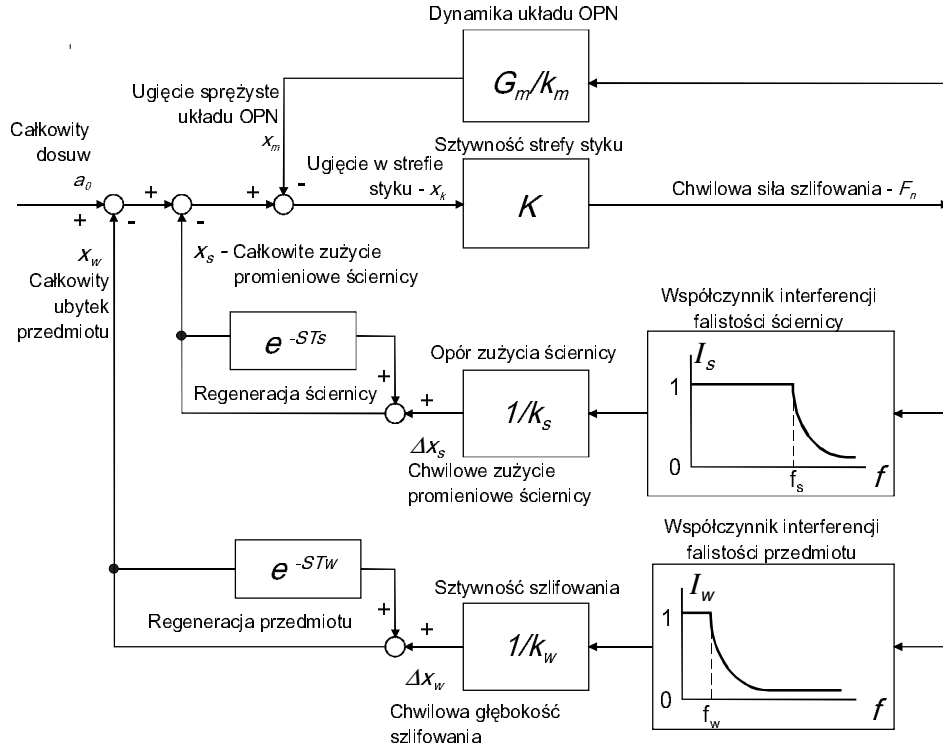
Źródłem drgań samowzbudnych jest sam proces szlifowania. Zjawiska towarzyszące powstawaniu wióra wymuszają drgania, które są przyczyną powstawania falistości zarówno na przedmiocie, jak i na ściernicy. Poza tym powierzchnie przedmiotu i ściernicy posiadają pewną początkową falistość i błędy kształtu. Podczas szlifowania, w wyniku ruchu obrotowego przedmiotu i ściernicy, przesunięcie fazowe pomiędzy powstałymi na ich obwodzie falami a wymuszonymi między przedmiotem i ściernicą drganiami względnymi, prowadzi po każdym kolejnym ich obrocie do zmiany głębokości szlifowania, a tym samym do zmiany amplitudy tych falistości. W pewnych warunkach amplitudy tych falistości mogą się systematycznie powiększać, co oznacza utratę stabilności procesu szlifowania [InKL-01, OcPo-86, SnBr-69]. Zjawisko rozwoju drgań samowzbudnych podczas szlifowania, określane często mianem efektu regeneracji drgań, dotyczy zarówno przedmiotu, jak i ściernicy.

Rozwijające się podczas szlifowania drgania samowzbudne mają istotny wpływ na geometryczną dokładność przedmiotu po szlifowaniu oraz na przebieg zużycia ściernicy. Celowe jest zatem monitorowanie tych drgań. Jednak dla prawidłowej interpretacji jego wyników, potrzebna jest znajomość wpływu parametrów procesu na przebieg drgań samowzbudnych.

Podstawą analizy stabilności procesu szlifowania i modelowania drgań samowzbudnych jest schemat blokowy ilustrujący relacje matematyczne pomiędzy poszczególnymi elementami struktury dynamicznej układu OUPN. W oparciu o liczne prace rozważające różne aspekty drgań samowzbudnych podczas szlifowania [AlWe-04, Hamr-90, InKL-01, SnBr-69, WeSc-79], do analizy znaczenia zjawisk dynamicznych dla nadzorowania tego procesu przyjęto schemat, który przedstawia rys. 3.5. Jest to schemat, który zaproponowali R. Snoeys i D. Brown [SnBr-69] o zmodyfikowanych przez autora tej pracy funkcjach współczynników interferencji falistości ściernicy i przedmiotu.

Schemat blokowy struktury dynamicznej procesu szlifowania wglębnego przedstawiony na rys. 3.5 uwzględnia sztywność szlifowania wyrażoną współczynnikiem k_w , opór zużycia ściernicy wyrażony współczynnikiem k_s , sztywność strefy styku ściernicy z przedmiotem wyrażoną współczynnikiem K oraz odkształcenie sprężyste układu OUPN będące funkcją jego podatności dynamicznej G_m i współczynnika sztywności statycznej k_m . 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.



Rys. 3.5. Schemat blokowy struktury dynamicznej procesu szlifowania wglębnego

Powiązania pomiędzy poszczególnymi elementami dynamiki procesu wynikają z zależności istniejących pomiędzy siłą skrawania i dynamicznymi przemieszczeniami ściernicy względem przedmiotu szlifowanego [SnBr-69]. Podstawą w zakresie przemieszczeń jest zasada mówiąca, że w dowolnej chwili czasowej całkowity dosuw ściernicy do przedmiotu od początku obróbki $a_0(s)$ jest równy sumie całkowitego ubytku promieniowego przedmiotu $x_w(s)$, całkowitego zużycia promieniowego ściernicy $x_s(s)$, chwilowego ugięcia sprężystego układu OUPN $x_m(s)$ oraz chwilowego ugięcia w strefie styku ściernicy z przedmiotem $x_k(s)$. A zatem:

$$a_0(s) = x_w(s) + x_s(s) + x_m(s) + x_k(s) \quad (3.9)$$

gdzie: $s = j\omega$ – argument transformaty Laplace’a.

Nominalny, chwilowy dosuw ściernicy do przedmiotu $\Delta a_0(s)$ w chwili t czasu liczonego od początku obróbki jest równy różnicy między dosuwem całkowitym osiągniętym w chwili t a dosuwem osiągniętym w chwili $(t - T_w)$, czyli o jeden obrót przedmiotu wcześniej. W zapisie operatorowym zależność ta ma postać:

$$\Delta a_0(s) = a_0(s)(1 - e^{-T_w s}) \quad (3.10)$$

Podobna zależność obowiązuje dla chwilowej głębokości szlifowania $\Delta x_w(s)$:

$$\Delta x_w(s) = x_w(s)(1 - e^{-T_w s}) \quad (3.11)$$

oraz dla chwilowego zużycia promieniowego ściernicy $\Delta x_s(s)$:

$$\Delta x_s(s) = x_s(s)(1 - e^{-T_s s}) \quad (3.12)$$

gdzie: T_w , T_s – odpowiednio, okres obrotu przedmiotu i ściernicy.

Zgodnie z dyskusją przeprowadzoną w rozdziale 3.2.2 można przyjąć, że chwilowa siła skrawania jest proporcjonalna do chwilowej głębokości szlifowania $\Delta x_w(s)$ i współczynnika sztywności szlifowania k_w . Wartość siły jest jednak modulowana przez współczynnik interferencji geometrycznej fal na przedmiocie $I_w(s)$. Stąd:

$$F_n(s) = \frac{k_w}{I_w(s)} \Delta x_w(s) \quad (3.13)$$

Podobnie wartość siły można wyrazić jako funkcję współczynnika oporu zużycia ściernicy k_s , chwilowego zużycia promieniowego ściernicy $\Delta x_s(s)$ i współczynnika interferencji fal na ściernicy $I_s(s)$:

$$F_n(s) = \frac{k_s}{I_s(s)} \Delta x_s(s) \quad (3.14)$$

Interpretacja znaczenia i wartości wprowadzonych współczynników interferencji fal dla regeneracji falistości na przedmiocie i na ściernicy zostanie podana w dalszej części tego rozdziału.

Podatność dynamiczna układu OUPN, czyli stosunek między jego odkształceniem sprężystym $x_m(s)$ a siłą skrawania $F_n(s)$ jest określona następującą zależnością:

$$\frac{x_m(s)}{F_n(s)} = \frac{G_m(s)}{k_m} \quad (3.15)$$

gdzie k_m jest współczynnikiem sztywności statycznej, a $G_m(s)$ – dynamiczną podatnością bezwymiarową będącą funkcją częstotliwości kątovej ω . Dla $\omega = 0$ podatność dynamiczna układu OPN jest odwrotnością sztywności statycznej k_m .

Założono, że sztywność strefy styku ściernicy z przedmiotem istotnie wpływa na stabilność procesu szlifowania i powinna być uwzględniona w jego modelu dynamicznym. Sztywność ta określana jest stosunkiem siły $F_n(s)$ do wywołanego tą siłą ugięcia sprężystego ściernicy $x_k(s)$ w strefie jej kontaktu z przedmiotem. Głównie z powodu cech budowy ściernic, charakterystyka statyczna sztywności strefy styku w funkcji siły szlifowania jest nieliniowa, szczególnie w zakresie małych sił [Hamr-90, InKL-01]. Jednakże dla uproszczenia przyjęto, że strefa styku może być traktowana jak sprężyna liniowa o sztywności K . Wówczas zależność między siłą skrawania a ugięciem w strefie syku ma następującą postać:

$$F_n(s) = Kx_k(s) \quad (3.16)$$

Dla ustalenia związków zachodzących pomiędzy zużyciem ściernicy oraz stanem parametrów jakości przedmiotu a rozwojem procesów dynamicznych podczas szlifowania, konieczna jest bardziej szczegółowa analiza tych procesów przeprowadzona w oparciu o schemat blokowy z rys. 3.5 i zależności od 3.9 do 3.16. Szczególnie istotnym zagadnieniem jest przebieg rozwoju drgań samowzbudnych oraz jego skutki dla rozwoju falistości przedmiotu i ściernicy.

Przebieg rozwoju drgań samowzbudnych podczas szlifowania determinują warunki stabilności tego procesu. Analizę tych warunków można przeprowadzić wykorzystując funkcję przejścia pomiędzy chwilową głębokością szlifowania $\Delta x_w(s)$ a chwilowym dosuwem ściernicy do przedmiotu $\Delta a_0(s)$ wyznaczoną na podstawie schematu blokowego procesu i obowiązujących dla niego zależności [SnBr-69]. Ma ona następującą postać:

$$\frac{\Delta x_w(s)}{\Delta a_0(s)} = \frac{1}{1 + \frac{I_s(s)k_w}{I_w(s)k_s} \frac{(1-e^{-T_w s})}{(1-e^{-T_s s})} + (1-e^{-T_w s}) \left[\frac{1}{K} + \frac{1}{k_m} G_m(s) \right] \frac{k_w}{I_w(s)}} \quad (3.17)$$

Po uwzględnieniu, że część rzeczywista wyrażenia typu $1/(1-e^{-T_w s})$ jest zawsze równa $1/2$, i, że każdy ze współczynników sztywności k może być odniesiony do szerokości szlifowania b , tworząc współczynniki sztywności właściwej k' , oraz po przyrównaniu mianownika transmitancji (3.17) do zera otrzymamy wyrażenie określające graniczne warunki stabilności procesu szlifowania:

$$-\frac{k_m}{b} \left[\frac{I_w}{2k'_w} + \frac{I_s}{2k'_s} + \frac{1}{K} \right] = G_m(s) \quad (3.18)$$

Prawa strona tego równania reprezentuje podatność dynamiczną układu OUPN, natomiast lewa strona reprezentuje pionową linię prostą leżącą w lewej półpłaszczyźnie płaszczyzny zespolonej, a jej każdy punkt odpowiada

kombinacji wartości kątów przesunięcia fazowego falistości dla dwóch kolejnych obrotów przedmiotu i ściernicy. Proces szlifowania będzie stabilny, jeśli obie te charakterystyki nie będą miały punktów wspólnych [Żela-76]. Oznacza to, że jeśli maksymalna ujemna wartość części rzeczywistej podatności dynamicznej $Re[G_m(s)]$ równa jest wartości lewej strony równania (3.18), to proces jest na granicy stabilności. A zatem osiągnięciu stabilności sprzyja powiększanie wartości $Re[G_m(s)]$ lub zmniejszanie wartości lewej strony tego równania.

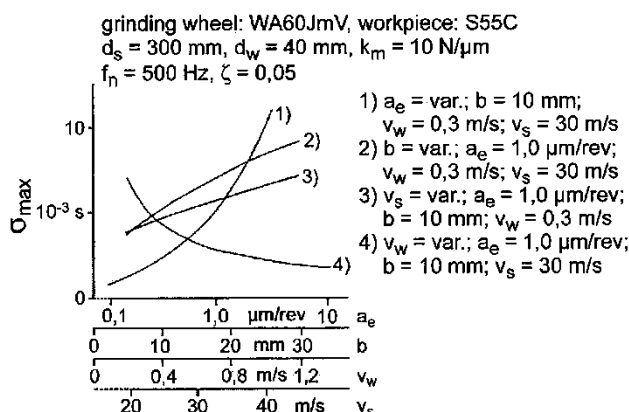
Powiększeniu wartości $Re[G_m(s)]$ sprzyjają wszystkie metody zmierzające do zwiększenia sztywności dynamicznej układu OPN. Sprowadzają się one do stosowania odpowiedniej konstrukcji szlifierek i ściernic oraz różnych urządzeń tłumiących drgania [InKL-01]. Efekty ich działania są niezależne od przebiegu procesu obróbczego, w związku z tym nie są one przedmiotem nadzorowania procesu.

Wartość wyrażenia po lewej stronie równania (3.40) zależy od wielkości nastawnych oraz od stanu procesu szlifowania. Dlatego może się ona zmieniać w czasie trwania procesu, a tym samym stan procesu wpływa na jego stabilność.

I. Inasaki [Inas-77] prowadził badania wpływu wielkości nastawnych na stabilność procesu szlifowania, analizując rozwój drgań samowzbudnych oddzielnie dla przedmiotu obrabianego i ściernicy. Jest to możliwe ze względu na dużą różnicę wartości między częstotliwościami krytycznymi przedmiotu f_w i ściernicy f_s (rys. 3.6). W tym celu wyznaczał położenie biegunów równania charakterystycznego transmitancji systemu na płaszczyźnie zespolonej dla różnych wielkości nastawnych. Zgodnie z ogólnym warunkiem stabilności układu zamkniętego, dodatnie wartości części rzeczywistej biegunów oznaczają brak stabilności, przy czym im wyższe są te wartości, tym wyższa jest szybkość narastania amplitudy, natomiast wartości części urojonej wyznaczają częstotliwość drgań samowzbudnych. Wyniki tych badań pozwalają wyprowadzić następujące wnioski:

- Szybkość narastania amplitudy drgań samowzbudnych dla przedmiotu jest znacznie wyższa niż dla ściernicy.
- Częstotliwość drgań samowzbudnych jest związana z częstotliwością własną układu OPN i zwykle jest od niej nieco wyższa.
- Zakres niestabilności dla drgań samowzbudnych ściernicy jest bardzo szeroki. Prawie wszystkie procesy szlifowania walcowego, prowadzone z parametrami nastawnymi w praktycznie stosowanych zakresach, przebiegają w warunkach niestabilności z punktu widzenia efektu regeneracji falistości na ściernicy.
- Drgania samowzbudne dla ściernicy rozwijają się szybciej dla większych głębokości szlifowania, mniejszych prędkości przedmiotu i wyższych prędkości ściernicy.

Rys. 3.6 przedstawia wyniki obliczeń maksymalnych wartości części rzeczywistej biegunów transmitancji dla drgań samowzbudnych ściernicy podczas szlifowania z różnymi parametrami nastawnymi.



Rys. 3.6. Wpływ parametrów nastawnych szlifowania węgelnego na szybkość narastania amplitudy falistości na ściernicy [Inas-77]

Wpływ niektórych warunków stałych i parametrów stanu procesu na stabilność jego przebiegu wynika bezpośrednio z analizy lewej strony równania (3.18). Wynika z niej, że osiągnięciu stabilności procesu sprzyja jak największa sztywność statyczna szlifierki k_m , natomiast wzrost sztywności szlifowania k_w , oporu zużycia ściernicy k_s , sztywności strefy styku K oraz szerokości szlifowania b powodują przybliżanie się do warunków procesu niestabilnego. Dla nadzorowania procesu szlifowania istotne znaczenie mają sztywność szlifowania k_w oraz opór zużycia ściernicy k_s , ponieważ ich wpływ jest dodatkowo modulowany zjawiskiem interferencji geometrycznej fal, zarówno dla przedmiotu, jak i dla ściernicy.

Ruch drganiowy pomiędzy przedmiotem obrabianym a ściernicą w czasie szlifowania powoduje ciągłe zmiany geometrii styku ściernicy z przedmiotem i w konsekwencji przyczynia się do powstawania falistości na powierzchni szlifowanej i na CPS. Falistość generowana na przedmiocie jest obwiednią obwodu CPS, a falistość na CPS jest obwiednią obwodu przedmiotu. Jednakże po osiągnięciu częstotliwości progowych wynikających z geometrycznych warunków interferencji fal [OcPo-86], fale na przedmiocie i na ściernicy zaczynają być „ścińcane”. Dla przedmiotu staje się to wówczas, kiedy połowa długości fali generowanej na jego powierzchni jest krótsza niż długość styku przedmiotu ze ściernicą [SnBr-69]. Dla ściernicy warunek ten dotyczy odpowiednio długości fali generowanej na CPS. Ta progowa częstotliwość dla przedmiotu wynosi wtedy:

$$f_w = \frac{v_w}{4\sqrt{y_c D_{eq}}} \quad (3.19)$$

natomiast częstotliwość progowa dla ściernicy:

$$f_s = \frac{v_s}{4 \sqrt{\gamma_c D_{eq}}} \quad (3.20)$$

gdzie: γ_c – głębokość szlifowania plus ugięcie w strefie kontaktu,

D_{eq} – równoważna średnica szlifowania $D_{eq} = d_w d_w / (d_w + d_s)$.

Jeśli częstotliwość drgań samowzbudnych pomiędzy przedmiotem obrabianym a ściernicą przekroczy częstotliwość progową dla przedmiotu lub dla ściernicy, to w wyniku interferencji geometrycznej wierzchołki fal powstałych odpowiednio na przedmiocie lub na ściernicy zaczynają być ścinane. Stopień tego ścinania wyraża współczynnik interferencji geometrycznej fal: I_w – dla przedmiotu i I_s – dla ściernicy (rys. 3.6). Jest on ilorazem wysokości fali pozostającej odpowiednio na powierzchni przedmiotu lub CPS do amplitudy generujących ją drgań samowzbudnych. Wartość tego współczynnika zmienia się nieliniowo w funkcji częstotliwości. A. Hamrol [Hamr-90] podaje, że z wystarczającym przybliżeniem zależność ta może być opisana w następujący sposób:

$$I_{w/s} = \begin{cases} 1 & \text{dla } f \leq f_{w/s} \\ \frac{1}{\sqrt{0,5 [1 + (f/f_{w/s})^4]}} & \text{dla } f > f_{w/s} \end{cases} \quad (3.21)$$

Przebieg zmian tych współczynników poglądowo pokazano na rys. 3.5.

Dla parametrów 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 jak powiedziano wcześniej są zbliżone do częstotliwości drgań własnych układu OUPN, mają zwykle wartości wyższe od częstotliwości progowej przedmiotu, ale znacznie niższe od częstotliwości progowej ściernicy. Oznacza to, że falistość ściernicy podczas tych procesów może rozwijać się do bardzo dużych wartości. Z tego względu stan drgań samowzbudnych powinien być nadzorowany, ponieważ jest ważnym symptomem stanu ściernicy. Jednocześnie drgania samowzbudne nie są wiarygodnym symptomem stanu falistości przedmiotu, ponieważ fale na przedmiocie są najczęściej ścinane przez ściernicę.

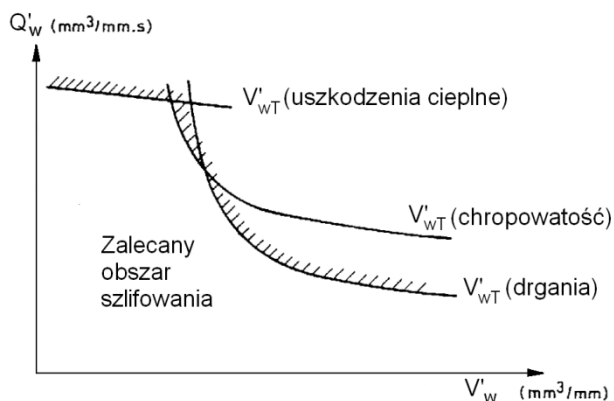
Korzystnym zjawiskiem jest fakt, że falistość na ściernicy rozwija się znacznie wolniej niż na przedmiocie. Wynika to z tego, że opór zużycia

ściernicy k_s jest znacznie większy od sztywności szlifowania k_w . Można to wykazać wychodząc z definicji wskaźnika szlifowania G , który jest ilorazem ubytku materiału przedmiotu i zachodzącego w tym samym czasie zużycia objętościowego ściernicy. Po przekształceniach otrzymamy:

$$k_s = k_w G q \quad (3.22)$$

Dla praktycznie występujących wartości wskaźników G i q , opór zużycia ściernicy k_s jest co najmniej kilkaset razy większy od sztywności szlifowania k_w , co w konsekwencji przyczynia się do znacznie szybszego rozwoju efektu regeneracji falistości na przedmiocie niż na ściernicy.

Powolny rozwój falistości na ściernicy powoduje, że rozwój drgań jako kryterium trwałości ściernicy nabiera znaczenia w miarę upływu czasu szlifowania od ostatniego obciążania ściernicy. To, czy drgania należy traktować jako najważniejsze kryterium trwałości ściernicy zależy jeszcze od kombinacji zastosowanych parametrów obróbki i parametrów obciążania ściernicy. Wyjaśnia to analiza zalecanego obszaru szlifowania (rys. 3.2) i wpływu wielkości nastawnych szlifowania na szybkość narastania amplitudy falistości (rys. 3.6). Przy wyższych wartościach właściwej wydajności objętościowej szlifowania Q'_w rozwój drgań samowzbudnych można opóźnić przez zastosowanie większych prędkości przedmiotu obrabianego v_w . Należy jednak pamiętać, że w miarę upływu okresu trwałości ściernicy zmienia się położenie ograniczeń zalecanego obszaru szlifowania wyznaczonego okresowym właściwym ubytkiem materiału obrabianego V'_{mT} określanym ze względu na uszkodzenia cieplne, dopuszczalną chropowatość i efekt regeneracji drgań na przedmiocie – rys. 3.7.



Rys. 3.7. Położenie ograniczeń zalecanego obszaru szlifowania ze strony uszkodzeń cieplnych, chropowatości powierzchni i drgań w zależności od zastosowanej właściwej wydajności objętościowej szlifowania Q'_w i właściwego ubytku materiału obrabianego V'_w [VePe-79] (tłumaczenie własne)

Dla wyższych wartości Q'_w decydujące znaczenie dla okresu trwałości ściernicy może mieć zagrożenie uszkodzeniami cieplnymi lub przekroczenie dopuszczalnej wartości chropowatości powierzchni obrabianej. Dla mniejszych wartości Q'_w o przydatności ściernicy decyduje przede wszystkim poziom drgań.

Przyczyną nadmiernych drgań podczas procesu szlifowania może być również niewyrównoważenie ściernicy. Identyfikacja tego typu drgań jest jednak stosunkowo łatwa ze względu na ścisły związek ich częstotliwości z prędkością obrotową ściernicy. Ponadto, coraz częściej szlifierki są wyposażane w urządzenia do automatycznego, dynamicznego wyrównowywania zespołu wrzeciono – ściernica [KwRa-91].

3.4. Nadzorowanie zjawisk cieplnych

Duża część energii mechanicznej dostarczanej do każdego procesu obróbki mechanicznej zamienia się w energię ciepłą. Cechą charakterystyczną szlifowania płaszczyzn oraz powierzchni walcowych jest to, że w zależności od warunków prowadzenia procesu aż 60% do 85% wydzielonego ciepła wnika do przedmiotu obrabianego. Ma to niezmiernie istotne znaczenie dla jakości warstwy wierzchniej przedmiotu i wydajności szlifowania.

Ciepło przenikające do przedmiotu w strefie kontaktu ze ściernicą powoduje lokalny wzrost temperatury jego warstwy przypowierzchniowej, co jest przyczyną zachodzących w niej odkształceń plastycznych, transformacji fazowych, mikropęknięć oraz innych zjawisk fizycznych i chemicznych. W konsekwencji dochodzi do zmiany rozkładu naprężeń własnych i mikrotwardości tej warstwy, a na powierzchni pojawiają się charakterystyczne barwne naloty nazywane przypaleniami szlifierskimi.

Wszystkie wymienione parametry warstwy wierzchniej decydują o właściwościach eksploatacyjnych przedmiotu, a więc powinny być objęte nadzorowaniem. Niestety ich bezpośrednia identyfikacja w trakcie trwania procesu, a nawet tuż po jego zakończeniu, jest bardzo utrudniona [JBMA-11]. Oczywiście wykluczone jest stosowanie metod pomiarowych wymagających zniszczenia przedmiotu. Natomiast istniejące nieniszczące metody pomiarowe cechują się raczej niską dokładnością i nie nadają się do stosowania on-line w warunkach przemysłowych [JBMA-11, Wójc-06]. W praktyce pozostaje stosowanie wskaźników skorelowanych z właściwościami warstwy wierzchniej, możliwych do wyznaczania w oparciu o wielkości nastawne procesu i pomiar wybranych wielkości procesowych.

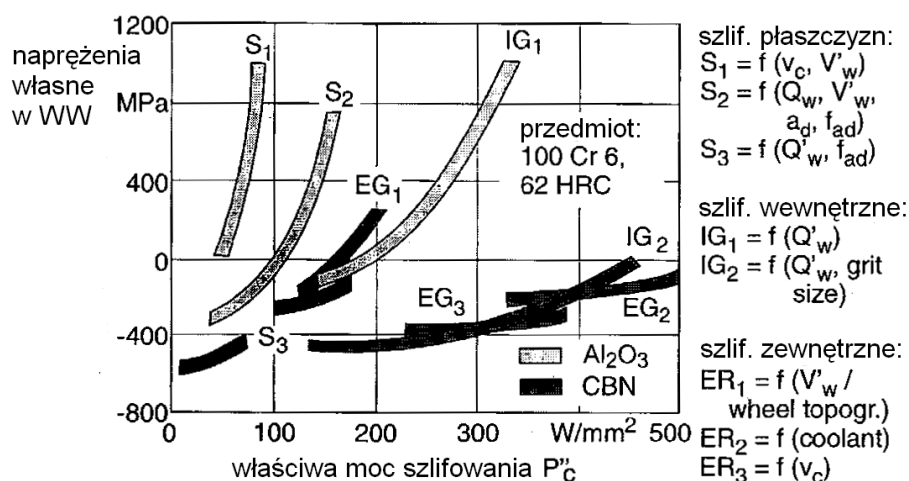
Równoważna grubość wióra h_{eq} , stosunek składowej normalnej siły szlifowania do składowej stycznej W , iloraz prędkości obwodowej ściernicy do prędkości przedmiotu q oraz ich kombinacje są łatwymi do wyznaczenia wskaźnikami dobrze skorelowanymi z właściwościami warstwy wierzchniej, ale tylko w przypadku szlifowania materiałów ceramicznych [Krus-01, Wójc-06]. Można to wytłumaczyć niską przewodnością cieplną tych materiałów.

Spośród wielkości procesowych, moc szlifowania jest bezpośrednio związana z ilością wytwarzanego ciepła. Wychodząc z tego założenia, I. Inasaki [Inas-98] wykorzystał pomiar mocy do nadzorowania przypałów szlifierskich. Moc szlifowania nie jest jednak parametrem, który samodzielnie decyduje o ilości ciepła wnikającego do przedmiotu. Dla konkretnych właściwości cieplnych materiału przedmiotu obrabianego, jego temperatura jest zależna od gęstości działającego strumienia ciepła. Biorąc za punkt wyjścia tę zasadę, jako parametr skorelowany z właściwościami warstwy wierzchniej zaproponowano gęstość strumienia mocy szlifowania P_c'' (często określanej również jako właściwa moc szlifowania), czyli moc szlifowania odniesioną do wielkości powierzchni styku ściernicy z przedmiotem obrabianym, obliczaną z następującej zależności:

$$P_c'' = \frac{F_t v_s}{b l_e} \quad (3.23)$$

gdzie: l_e – rzeczywista długość styku ściernicy z przedmiotem obrabianym.

E. Brinksmeier [Brin-91] wykonał badania zależności naprężeń własnych w warstwie wierzchniej po szlifowaniu od wartości P_c'' dla wielu rodzajów szlifowania i ściernic. Przykładowe wyniki pokazuje rys. 3.8.



Rys. 3.8. Zależność naprężeń własnych w warstwie wierzchniej po szlifowaniu od właściwej mocy szlifowania [Brin-91] (tłumaczenie własne)

Jak pokazuje rys. 3.8, wadą właściwej mocy szlifowania jako wskaźnika stanu właściwości warstwy wierzchniej jest jej wyraźna zależność od odmiany szlifowania i zastosowanej ściernicy. Ponadto do jego wyznaczenia konieczna jest znajomość rzeczywistej długości styku ściernicy z przedmiotem obrabia-

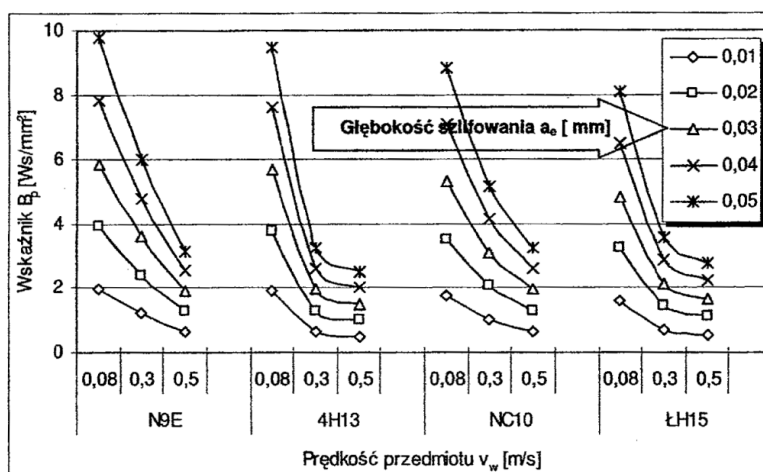
nym, która może być jedynie oszacowana na podstawie znajomości geometrycznej długości styku.

Obok wartości gęstości strumienia ciepła, na rozkład temperatury, a tym samym naprężeń powstających w przedmiocie, ma wpływ czas kontaktu poszczególnych punktów na obwodzie przedmiotu ze ściernicą. Czas ten jest określony długością rzeczywistego kontaktu ściernicy z przedmiotem l_e i prędkością przedmiotu v_w . Na tej podstawie, B. Kruszyński i R. Wójcik [KrWó-01] zaproponowali nowy wskaźnik właściwości warstwy wierzchniej B_p będący iloczynem właściwej mocy szlifowania i czasu kontaktu dowolnego punktu na powierzchni przedmiotu ze ściernicą podczas jego jednego obrotu:

$$B_p = \frac{F_t v_s l_e}{b l_e v_w} = \frac{F_t v_s}{b v_w} \quad (3.24)$$

Wskaźnik B_p jest łatwy do wyznaczenia podczas szlifowania. W praktyce wymaga jedynie pomiaru składowej stycznej siły szlifowania, ponieważ pozostałe wielkości to parametry nastawne, które można traktować jako stałe.

W pracy [Wójc-06] R. Wójcik zamieścił wyniki obszernych badań zależności wskaźnika B_p od parametrów szlifowania, charakterystyki ściernicy i rodzajów szlifowania podczas szlifowania wielu gatunków stali. Rys. 3.9 podaje w syntetyczny sposób fragment otrzymanych wyników. Charakter prezentowanych zależności jest reprezentatywny dla wszystkich przebadanych przypadków.



Rys. 3.9. Zależność wskaźnika B_p od prędkości przedmiotu i głębokości szlifowania dla szlifowania wglębnego różnych stali ściernicą 25A80G [Wójc-06]

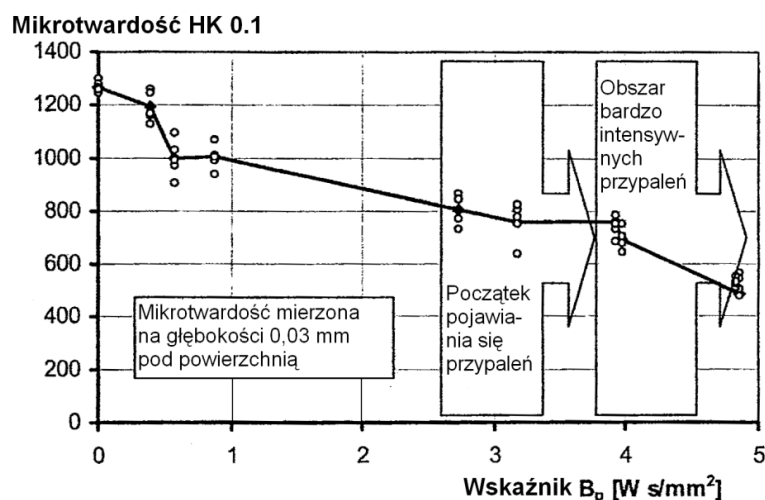
Na uwagę zasługuje bardzo podobny przebieg zależności na wykresach z rys. 3.9 dla wszystkich szlifowanych materiałów. Podobny przebieg zależności, lecz o bardziej zróżnicowanym wpływie parametrów szlifowania, otrzymano podczas szlifowania różnymi ściernicami. W tej samej pracy R. Wójcik wykazał eksperymentalnie, że dla wszystkich przebadanych przypadków zależność naprężeń własnych σ w warstwie wierzchniej od wskaźnika B_p można aproksymować funkcją liniową o następującej postaci:

$$\sigma = AB_p - B \quad (3.25)$$

gdzie: A , B – stałe współczynniki, zależne od rodzaju szlifowanego materiału i zastosowanej ściernicy.

Wskaźnik B_p jest również dobrze skorelowany ze zmianami mikro-twardości i przypaleniami warstwy wierzchniej. Ilustruje to rys. 3.10 [Krus-01].

Wykres na rys. 3.10 pokazuje, że zmiany właściwości warstwy wierzchniej w funkcji wskaźnika B_p następują etapami. Dla $B_p < 1$ następuje skokowa zmiana mikro-twardości oznaczająca progową wartość wskaźnika, przy której zachodzą zmiany strukturalne. Natomiast dla wartości $B_p \cong 2$ zaczynają występować przypalenia powierzchni szlifowanej.



Rys. 3.10. Mikro-twardość i przypalenia warstwy wierzchniej w zależności od wartości wskaźnika B_p [Krus-01] (tłumaczenie własne)

Przytoczone wyniki badań pokazują, że pomiar mocy szlifowania, który może być zrealizowany poprzez pomiar składowej stycznej siły szlifowania jest przydatny w nadzorowaniu uszkodzeń cieplnych warstwy wierzchniej przedmiotu szlifowanego. Łatwy do wyznaczenia na podstawie tego pomiaru

wskaźnik B_p jest dobrze skorelowany ze zmianami naprężeń własnych, mikrotwardości i przypaleniami warstwy wierzchniej. Właściwa moc szlifowania P_c'' jest wskaźnikiem trudniejszym do dokładnego wyznaczenia i skorelowania z właściwościami warstwy wierzchniej.

Istnieją również próby wykorzystania pomiarów emisji akustycznej do nadzorowania uszkodzeń cieplnych warstwy wierzchniej przedmiotu szlifowanego [LiCG-05, PIDP-00, WeDL-96, WeMB-94, WWAW-01]. Opierają się one na podstawowym ustaleniu, że sygnał EA generowany jest przez zjawiska związane z deformacją struktury materiału przedmiotu oraz tarcia w strefie tworzenia wióra i dlatego jest dobrze skorelowany z warunkami kształtującymi powierzchnię po obróbce. Wyniki tych prac omówiono w rozdziale 2.3.4.

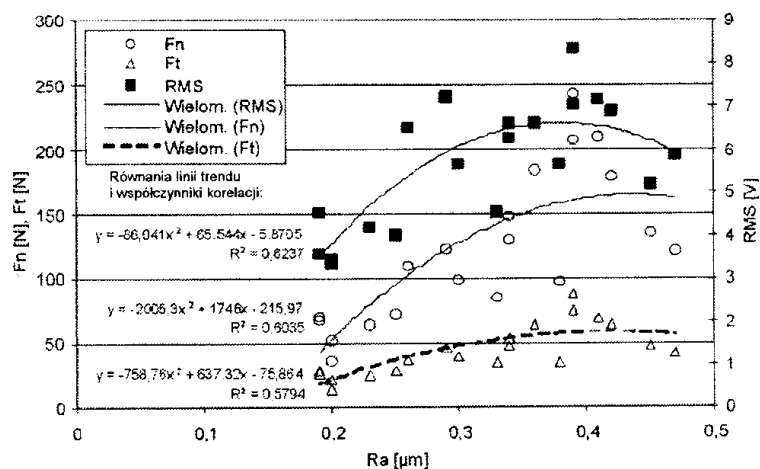
3.5. Nadzorowanie chropowatości powierzchni przedmiotu szlifowanego

Chropowatość powierzchni przedmiotu po szlifowaniu jest jednym z najważniejszych wyników procesu, bardzo często stosowanym jako podstawowe kryterium oceny prawidłowości jego przebiegu. W zależności od zastosowanych wielkości nastawnych szlifowania i obciążania, chropowatość może decydować o okresie trwałości ściernicy. Modelowanie chropowatości w funkcji wielkości wejściowych procesu szlifowania było przedmiotem wielu prac badawczych [BTIP-93, OcBu-00, OcPo-86, TPIP-92]. Były to modele empiryczne, uwzględniające parametry nastawne oraz częściowo stan procesu i zdolność skrawną ściernicy. Jednak nadmierna liczba empirycznych współczynników powoduje małą praktyczną przydatność tych modeli. Ponadto nie uwzględniają one w dostateczny sposób wyjściowej topografii CPS, będącej wynikiem parametrów obciążania oraz zmian zachodzących w tej topografii w wyniku zużywania się CPS w okresie jej trwałości.

Z punktu widzenia nadzorowania procesu szlifowania szczególne znaczenie mają prace, w których wykazano korelację między siłą szlifowania oraz wartością skuteczną emisji akustycznej a chropowatością powierzchni szlifowanej [Hamr-90, Inas-85, Plic-02, SuPl-03, TöFB-02]. Przykład uzyskanych zależności dla szlifowania płaskiego stali narzędziowej ściernicą elektrokorundową pokazuje rys. 3.11.

Uzyskane doświadczalnie zależności nie wskazują jednak na dobrą korelację między badanymi wielkościami procesowymi a chropowatością i nie mogą być uogólniane. W zależności od zastosowanych parametrów nastawnych, znak współczynnika korelacji pomiędzy siłą szlifowania a chropowatością może się zmieniać w zależności od dominującego mechanizmu zużycia ściernicy [Hamr-90]. Trochę lepszą korelację chropowatość wykazuje z sygnałem emisji akustycznej (rys. 3.11). Wynika to z tego, że sygnał EA jest bezpośrednio związany z aktywnością poszczególnych ziaren na powierzchni CPS kształ-

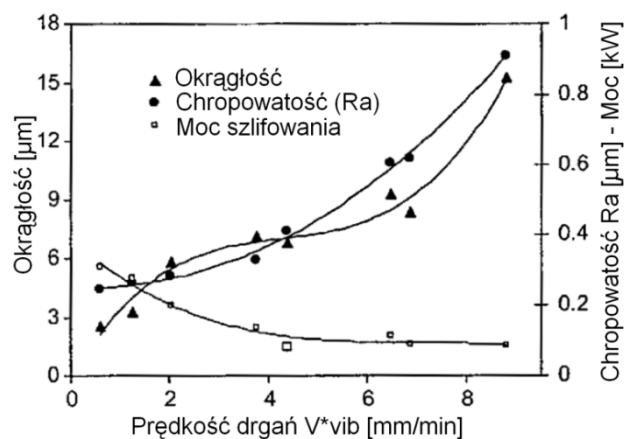
tujących topografię powierzchni przedmiotu. Mimo to, szacowanie chropowatości jedynie na podstawie wartości wybranej cechy jednego sygnału pomiarowego (np. wartości skutecznej) jest ryzykowne.



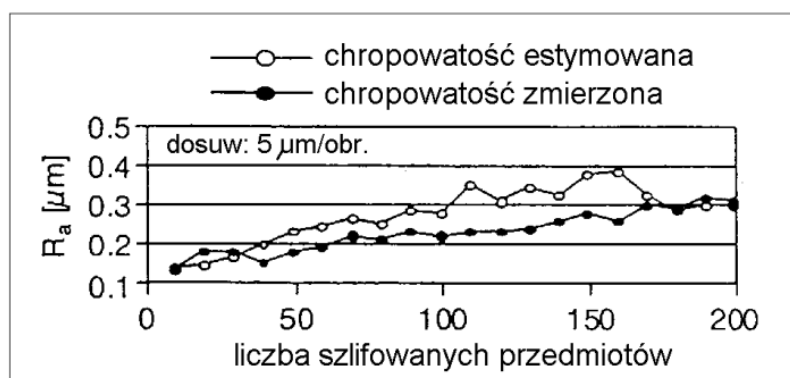
Rys. 3.11. Zależność pomiędzy chropowatością powierzchni szlifowanej a wartością skuteczną EA i składowymi siły szlifowania [SuPl-03]

W praktyce, chropowatość prawie zawsze rośnie wraz z upływem okresu trwałości ściernicy. Wynika to z tego, że chropowatość jest efektem kinematyczno-geometrycznego przenikania się topografii CPS i powierzchni przedmiotu, na który nakładają się drgania zachodzące pomiędzy ściernicą a przedmiotem. Drgania powodują spadek liczby ostrzy skutecznych, a tym samym wzrost przekroju wiórów przypadających na jedno ostrze i w konsekwencji wzrost chropowatości szlifowanej powierzchni. Wobec nieuchronnego rozwoju drgań samowzbudnych (rozdział 3.3), w miarę upływu okresu trwałości ściernicy, mechanizm ten zaczyna dominować w kształtowaniu chropowatości przedmiotu. Potwierdzeniem tego są wyniki doświadczalnej analizy zależności chropowatości od chwilowej prędkości drgań zaprezentowane w [OIFW-08] – rys. 3.12.

Skutecznym rozwiązaniem zagadnienia estymacji chropowatości może być zastosowanie jej modelowania, np. metodami sztucznej inteligencji, w oparciu o większą liczbę miar wielkości procesowych z uwzględnieniem wybranych wielkości wejściowych. Przykład wyników takiego modelowania za pomocą sytemu neuro-fuzzy podczas szlifowania wglębnego wałków pokazuje rys. 3.13. Wielkościami wejściowymi do tego modelu były: składowa stała (poniżej 10 Hz) oraz dynamiczna (powyżej 1 kHz) obwiedni sygnału EA, dosuw i skumulowany właściwy ubytek materiału obrabianego.



Rys. 3.12. Zależność chropowatości, błędu kołowości i mocy szlifowania od chwilowej prędkości drgań [OIFW-08] (tłumaczenie własne)



Rys. 3.13. Wyniki estymacji chropowatości powierzchni za pomocą systemu neuro-fuzzy [KaWI-00] (tłumaczenie własne)

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że przydatność istniejących modeli chropowatości w postaci jawnych zależności matematycznych w nadzorowaniu szlifowania jest znikoma. Wobec braku skutecznych metod pomiaru chropowatości w trakcie szlifowania, pozostaje jej modelowanie w oparciu o pomiar wybranych wielkości procesowych.

3.6. Podsumowanie analizy uwarunkowań automatycznego nadzorowania szlifowania w głębokiego kłowego

Przeprowadzone w rozdziałach 2 i 3 rozważania przedstawiają uwarunkowania zrealizowania automatycznego nadzorowania procesu szlifowania

kłowego i budowy systemu inteligentnego. Uwarunkowania te dotyczą zarówno układów monitorowania procesu (hardware systemu), jak i znalezienia odpowiednich metod identyfikacji stanu procesu (software systemu). Rozważania te pozwalają na sformułowanie następujących ogólnych zasad i wytycznych do budowy strategii identyfikacji stanu procesu opierających się na pomiarach sygnałów pośrednio charakteryzujących ten stan:

1. Dla stacjonarnych warunków szlifowania i ustalonej zdolności skrawnej ściernicy istnieje tzw. akceptowalny obszar parametrów nastawnych szlifowania. Obszar ten ograniczony jest możliwością powstania przypaleń i innych uszkodzeń cieplnych powierzchni obrabianej, utraty stabilności procesu spowodowanej efektem regeneracji drgań samowzbudnych oraz dopuszczalną chropowatością powierzchni. Dowolny punkt wewnątrz tego obszaru wyznacza parametry nastawne procesu spełniające wszystkie ograniczenia. Jednakże, głównie ze względu na ciągłą zmianę zdolności skrawnej ściernicy, proces szlifowania ma charakter losowy i niestacjonarny. Skutkuje to przemieszczaniem się granic zalecanego obszaru szlifowania w czasie pojedynczego okresu trwałości ściernicy. Wobec losowości tych zakłóceń, najefektywniejszą metodą utrzymania procesu w stanie, w którym spełnione są wszystkie ograniczenia jest ciągłe monitorowanie stanu zużycia ściernicy oraz zjawisk ograniczających jego prawidłowy przebieg.
2. Nadzorowanie procesu w inteligentnym systemie szlifowania kłowego powinno opierać się na pomiarach parametrów procesu możliwych do zrealizowania w trakcie jego trwania, uzupełnionych pomiarami wymiaru i kształtu szlifowanego przedmiotu. Najczęściej stosowany jest pomiar mocy szlifowania, składowych siły szlifowania, drgań oraz emisji akustycznej. Układ monitorowania procesu to co najmniej jeden lub więcej przetworników pomiarowych generujących sygnały pozwalające na wyznaczenie wybranych wartości cech tych sygnałów, stanowiących potencjalne symptomy stanu procesu i zdolności skrawnej ściernicy.
3. Każda z wymienionych wielkości procesowych posiada duży potencjał w zakresie przydatności do nadzorowania stanu zdolności skrawnej ściernicy oraz stanu procesu. Pokazuje to zestawienie zawarte w tabeli 3.1. Stosowanie jednak prostych, uzyskiwanych bezpośrednio z pomiaru (np. wartość średnia), miar sygnałów pomiarowych wielkości procesowych z reguły nie daje zadowalających rezultatów oceny stanu procesu. Ten duży potencjał przydatności poszczególnych pomiarów zawarty jest w miarach opisujących ich cechy dynamiczne. Ujawnienie tych cech wymaga zastosowania zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów. Wobec tego podstawowe znaczenie ma dobór czujników wielkości procesowych i metod przetwarzania sygnałów pomiarowych, zapewniających najbardziej reprezentatywny zestaw miar opisujących nadzorowane zjawiska. Rozwiązanie tego problemu jest tym trudniejsze, że jest specyficzne dla konkretnego zadania technologicznego.

Tabela 3.1. Ocena przydatności dynamicznych wielkości wyjściowych procesu szlifowania wglębnego do nadzorowania stanu procesu

Wielkość wyjściowa	Dominujące oddziaływanie na wyniki szlifowania	Przydatność do nadzorowania stanu ściernicy/procesu	Możliwość dokonania pomiaru
Moc szlifowania	Stan warstwy wierzchniej (ze wzrostem mocy zwiększa się ilość ciepła przepływającego do przedmiotu)	- Ustalona zależność jakościowa i ilościowa ze stanem warstwy wierzchniej (wskaźniki B_p , P_c'')	Łatwy pomiar, niski koszt, duża niezawodność, słaba dynamika
Siła styczna		- W przypadku przewagi zużycia ściernego, w połączeniu z wydajnością objętościową określa zdolność skrawną ściernicy - Występuje korelacja z chropowatością	Trudna instalacja czujników w układzie OUPN często powodująca zmiany właściwości tego układu, wysoki koszt, niska niezawodność działania
Siła normalna			
Drgania	Makrogeometria CPS i przedmiotu (efekt regeneracji) Mogą prowadzić do utraty stabilności procesu i uszkodzenia ściernicy lub przedmiotu	- Wysoka korelacja z makrozuzyciem ściernicy - Korelacja z błędem kształtu i falistością przedmiotu	Łatwa instalacja czujnika, średni koszt, duża niezawodność
Emisja akustyczna	Brak oddziaływania na wyniki szlifowania	- Korelacja wartości skutecznej EA z chropowatością i siłą normalną - Korelacja charakterystyki częstotliwościowej ze zużyciem ściernicy	Łatwa instalacja czujnika, średni koszt, średnia niezawodność, wrażliwość na tor propagacji sygnału

4. Klasyfikacja stanu procesu będzie znacznie bardziej wiarygodna jeśli zostanie przeprowadzona w oparciu o więcej niż jeden symptom. Wymaga to posłużenia się modelem zależności pomiędzy wybranymi wielkościami wyjściowymi procesu a wyznaczonymi symptomami. W celu ograniczenia wpływu wielkości wejściowych procesu na wynik klasyfikacji, wielkości te powinny być uwzględnione wśród wielkości wejściowych modelu. W syste-

mach nadzorowania stosowane są prawie wyłącznie modele empiryczne, najczęściej oparte na metodach sztucznej inteligencji. W mniejszym stopniu wykorzystywane są modele fizyczno-empiryczne, głównie oparte na analizie regresji danych doświadczalnych. O wyborze rodzaju zastosowanego modelu w pierwszym rzędzie decyduje jego pracochłonność oraz zdolność do uogólniania i aktualizacji. Nowe możliwości w zakresie modelowania stwarzają hybrydowe modele sztucznej inteligencji.

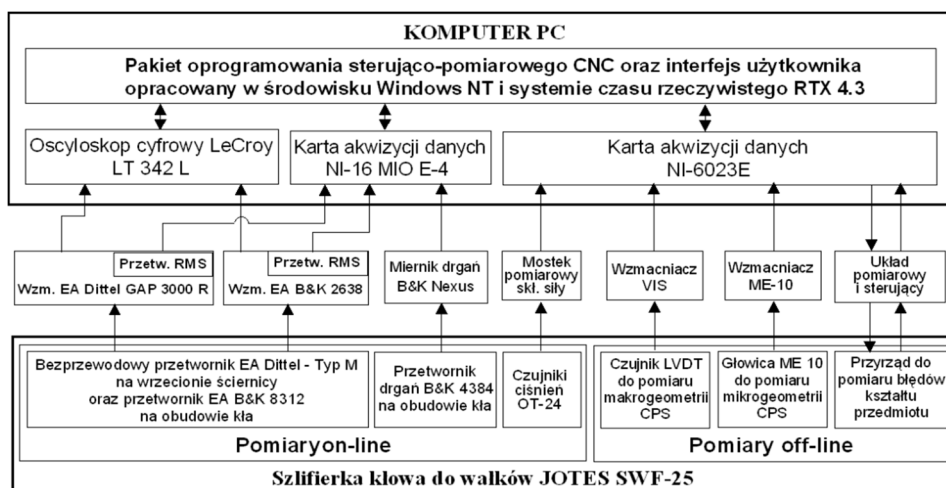
Z rozważań przeprowadzonych w rozdziałach 2 i 3 wynikają też następujące wnioski dotyczące dalszej części niniejszej pracy:

1. Należy doświadczalnie zweryfikować wnioski wypływające z analizy teoretycznej i literatury zamieszczone powyżej.
2. Badania doświadczalne należy przeprowadzić na szlifierce wyposażonej w układy pomiarowe pozwalające na pomiar i rejestrację podczas szlifowania sygnałów pomiarowych wielu wielkości procesowych charakteryzujących możliwie wszechstronnie przebieg i wyniki szlifowania.
3. Z przeprowadzonej analizy wynika, że zestaw mierzonych wielkości procesowych powinien obejmować: siłę szlifowania, drgania wibroakustyczne i emisję akustyczną.
4. Wyniki pomiarów on-line wymienionych wielkości procesowych należy skonfrontować z wynikami pomiarów wielkości bezpośrednio charakteryzujących wyniki szlifowania, takich jak: parametry profilu CPS, chropowatość i falistość powierzchni szlifowanej wykonanymi off-line. Pozwoli to na ustalenie i zweryfikowanie związków zachodzących między obiema grupami wielkości.
5. W oparciu o dokonane pomiary należy poszukiwać efektywnych metod przetwarzania sygnałów pomiarowych pozwalających na znalezienie dobrego zestawu symptomów pozwalającego na wielokryterialną ocenę stanu i wyników procesu szlifowania.

4. BADANIA DOŚWIADCZALNE

4.1. Stanowisko badawcze

Badania doświadczalne wykonano na stanowisku będącym efektem kolejnych projektów badawczych w zakresie automatyzacji procesu szlifowania prowadzonych w Instytucie Obrabiarek i TBM PŁ od 1986 roku. Stanowisko to zbudowano w oparciu o uniwersalną szlifierkę do wałków SWF-25 firmy JOTES. W ramach kolejnych modernizacji szlifierka została wyposażona w prowadnice hydrostatyczne stołu i wrzeciennika ściernicy, hydrostatyczny układ łożyskowania wrzeciona ściernicy oraz serwonapędy dosuwu ściernicy, obrotów przedmiotu i posuwu stołu, a także w odpowiednie układy pomiarowe [Lajm-03, LaLe-12, LeLa-00, LeLa-04, LeRa-92, LeRa93, Lewa-02, Orna-95, RaLL-00, Wrąb-93]. Działanie wszystkich układów pomiarowych i napędowych oparto o komputer klasy Pentium PC wyposażony w odpowiednie karty pomiarowe i sterujące [Lajm-03]. Wprowadzone modyfikacje nadały jej cechy typowe dla obecnie produkowanych szlifierek sterowanych numerycznie oraz umożliwiły monitorowanie procesu szlifowania. Schemat układów pomiarowych tego stanowiska przedstawia rys. 4.1.



Rys. 4.1. Schemat układów pomiarowych stanowiska badawczego

Na system monitorowania procesu w trybie czasu rzeczywistego (on-line) składały się układy pomiaru wszystkich składowych siły szlifowania, drgań i emisji akustycznej (EA). Ponadto, szlifierka została wyposażona w działające w systemie off-line przyrządy specjalne do pomiaru makrogeometrii i mikrogeometrii zarysu profilu CPS [LaLe-12, LeLa-04] oraz do pomiaru aktywnej

kontroli szlifowanego przedmiotu pozwalający na jednoczesny pomiar jego średnicy i błędu kształtu [Lajm-03]. Taki wybór wielkości mierzonych został podyktowany oceną możliwości zrealizowania niezawodnych układów pomiarowych i potrzebą uzyskania zestawu sygnałów pomiarowych wszechstronnie charakteryzujących proces. Wybrane sygnały, po odpowiednim przetworzeniu, pozwalają na utworzenie zestawu symptomów stanu procesu umożliwiających jego wielokryterialną ocenę, ponieważ źródła powstawania poszczególnych sygnałów są różne.

Do pomiaru EA zastosowano dwa czujniki – z transmisją przewodową B&K 8312 i bezprzewodową Dittel-Typ M. Pierwszy z nich umiejscowiony był na obudowie kła konika, a drugi na powierzchni czołowej wrzeciona ściernicy. Oba układy pomiarowe umożliwiały pomiar sygnału oryginalnego EA w zakresie do 1 MHz. Wzmacniacze obu czujników były wyposażone w przetwornik wartości skutecznej sygnału, co pozwalało na jej jednoczesną rejestrację z sygnałem oryginalnym. Sygnał z czujnika na obudowie kła konika był wykorzystywany do wykrywania kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym, natomiast do monitorowania procesu wykorzystywano czujnik bezprzewodowy.

Drgania w zakresie do 10 kHz mierzone były przez czujnik B&K 4384 zamontowany na obudowie kła konika. Takie umiejscowienie czujnika zapewniało zachowanie stałej odległości czujnika od strefy szlifowania oraz dobry stosunek sygnału użytecznego do szumu.

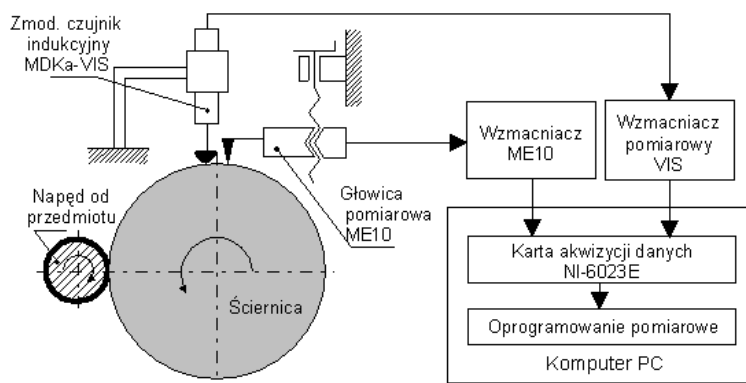
Do pomiaru składowych siły szlifowania wykorzystywano pomiar różnicy ciśnień w odpowiednich komorach łożysk hydrostatycznych wrzeciona ściernicy [Lewa-02].

Dla realizacji zadań sterowania procesu szlifowania oraz pomiaru wielkości wyjściowych procesu wykonano specjalizowane oprogramowanie w środowisku BORLAND i Visual C++ [Lajm-03, LaLe-12]. Zostało ono napisane jako aplikacja Win32NT z nakładką czasu rzeczywistego i składało się z dwóch modułów – modułu edytora cyklu szlifowania CNC oraz pomiaru sygnału drgań i EA, a także z modułu sterowania układami napędowymi i realizacji pomiaru składowych sił szlifowania. Moduł interfejsu CNC służył do edycji programu CNC oraz wizualizacji danych zebranych przez poprzedni moduł.

Szlifierka została również wyposażona w działające w systemie off-line układy pomiaru parametrów CPS. Do pomiaru makrogeometrii profilu zarysu CPS, czyli jej falistości wykorzystano zmodyfikowany indukcyjny czujnik różnicowy MDKa-VIS wyposażony w końcówkę pomiarową z płożą wykonaną z kryształu leukoszaferu i wzmacniacz pomiarowy VIS. Testowanie czujnika na wałku kontrolnym wykazało odchyłki od rejestrowanego zarysu w kolejnych obrotach nie większe niż $\pm 0.2 \mu\text{m}$, co dla zakresu pomiarowego $200 \mu\text{m}$ należy uznać za w pełni wystarczające do pomiaru falistości CPS. Czujnik ten był mocowany do obudowy ściernicy za pomocą zmodyfikowanego uchwytu magnetycznego. Podczas pomiarów ściernica była napędzana ciernie poprzez dociskanie do niej szlifowanego wałka, na który nałożono gumowe pierścienie.

Stabilne, odpowiednio wolne obroty ściernicy w czasie pomiarów były możliwe dzięki wykorzystaniu precyzyjnego serwonapędu DC obrotów przedmiotu. Ta sama zasada napędu przedmiotu została wykorzystana w przyrządzie do pomiaru zarysu topografii CPS.

Do pomiaru zarysu topografii CPS wykorzystano głowicę pomiarową i wzmacniacz chropowatościomierza ME-10 firmy Carl Zeiss Jena. Rozdzielczość pomiaru wysokości profilu wynosiła $1/15 \mu\text{m}$, a zakres pomiarowy $200 \mu\text{m}$. Taka rozdzielczość pomiaru wynikała z procesu wzorcowania czujnika i rozdzielczości zastosowanej karty analogowo-cyfrowej. Oczywiście dokładność pomiaru była mniejsza, jednak w pełni wystarczająca do pomiaru wysokości zarysu profili ściernicy, które były o rząd wielkości większe od zarysów profili przedmiotów podczas pomiaru parametrów chropowatości, do pomiaru których w oryginale ten układ pomiarowy był przeznaczony. W celu skutecznego odfiltrowania zakłóceń pomiarowych wynikających z niedoskonałości samej metody pomiarowej (rozdział 3.2.2), stosowano bardzo małą prędkość obwodową ściernicy podczas wykonywania pomiarów wynoszącą około $0,1 \text{ mm/s}$. Pomiary wykonywano z trzykrotnym powtórzeniem. Na każdy pomiar składa się co najmniej 2500 próbek pomiarowych wyznaczanych co $0,01 \text{ mm}$ obwodu ściernicy, co daje długość odcinka pomiarowego równą co najmniej 25 mm . Głowica pomiarowa była umieszczona na specjalnym suporcie zamontowanym na ścianie obudowy ściernicy. Suport umożliwiał precyzyjne pozycjonowanie igły na ściernicy i wykonywanie pomiaru zarysu topografii CPS prostopadłe do jej obwiedni w kierunku równoległym do wektora prędkości szlifowania. Pomiary były wykonywane bez konieczności otwierania obudowy poprzez wykonany w niej otwór, zamykany na czas szlifowania. Do akwizycji danych falistości i zarysu topografii CPS wykonano specjalizowane oprogramowanie [Lajm-03, LaLe-12]. Schemat układów pomiaru falistości i zarysu topografii CPS pokazano na rys. 4.2.



Rys. 4.2. Schemat układów pomiaru makro- i mikrogeometrii zarysu profilu CPS

Przyrząd do pomiaru błędów kształtu i falistości przedmiotu posiadał dwie głowice pomiarowe specjalnej konstrukcji [Lajm-03]. Ich zakres pomiarowy wynosił 1 mm z rozdzielczością 0,2 μm . Głowice pomiarowe przymocowano do ruchomych ramion, co umożliwiało pomiar przedmiotów o średnicach do 250 mm. Korpus przyrządu był przymocowany do kolumny posadowionej na fundamencie szlifierki i przymocowanej do jej korpusu. Sterowanie pracą przyrządu oraz rejestracja wyników pomiarów odbywała się za pomocą głównego programu sterującego CNC.

Ponadto, w celu sprawdzenia jakości przedmiotu po obróbce, przeprowadzany był w systemie off-line pomiar chropowatości jego powierzchni w kierunku równoległym do jego osi z wykorzystaniem profilometru przenośnego typu Hommel Tester T1000, produkcji firmy HOMMELWERKE.

Sterowanie układami napędowymi szlifierki oraz rejestrację wszystkich danych pomiarowych w postaci binarnej, z wyjątkiem oryginalnego sygnału EA, realizowano za pomocą oprogramowania wykonanego przez P. Lajmerta [Lajm-03, LeLa-04]. Zarejestrowane sygnały pomiarowe w postaci binarnej były przetwarzane na pliki tekstowe za pomocą własnego oprogramowania wykonanego w języku BORLAND C++ [Fili-04]. Do analizy spektralnej i statystycznej sygnałów wykorzystano własny pakiet programowy nazwany DAQSYSTEM wykonany w środowisku LabVIEW [Prus-07] i pakiet STATISTICA.

Pakiet programowy DAQSYSTEM składa się z czterech modułów: DAQ, DATA VIEW, FFT i WA.

Moduł DAQ służy do akwizycji danych przy użyciu trzech kart pomiarowych National Instruments: NI6221, NI6040E oraz NI5120. Moduł ten nie był wykorzystywany w omawianych badaniach doświadczalnych. Wykorzystywano natomiast wszystkie trzy pozostałe moduły.

Moduł DATA VIEW służy do wstępnej analizy zarejestrowanych danych na podstawie ich wykresu i przewijanej tabeli wartości liczbowych kolejnych próbek wybranego do analizy sygnału.

Moduł FFT jest programem służącym do analizy spektralnej za pomocą DFT sygnałów pomiarowych wybranej wielkości składających się na cały okres trwałości ściernicy. Po podaniu przez użytkownika zastosowanej podczas akwizycji częstotliwości próbkowania i wyborze typu okna do zastosowania w analizie, program prezentuje wykres widma wybranego sygnału w zakresie do częstotliwości Nyquista i tabelę wartości współczynników tego widma. Program może również przedstawić szczegółowy obraz tego widma i wartości jego współczynników w podanym przez użytkownika zakresie częstotliwości. Ponadto użytkownik może przeprowadzić usuwanie trendu z wyników analizy poprzez dekompozycję sygnału za pomocą dyskretnej transformaty falkowej, wybierając jedynie poziom dekompozycji i typ falki. Moduł ten służy również do analizy statystycznej wyników DFT. Z widm w wybranym zakresie częstotliwości może być wyznaczona wartość średnia, odchylenie standardowe, wariancja i wartość skuteczna ich współczynników oraz wykonany ich wykres,

jednocześnie dla wszystkich plików sygnału zarejestrowanych w kolejnych próbach składających się na cały okres trwałości ściernicy. Pozwala to na zobrazowanie zmian wartości wymienionych miar statystycznych w okresie trwałości ściernicy. Wszystkie wyniki przeprowadzonej analizy mogą być zapisane do plików tekstowych.

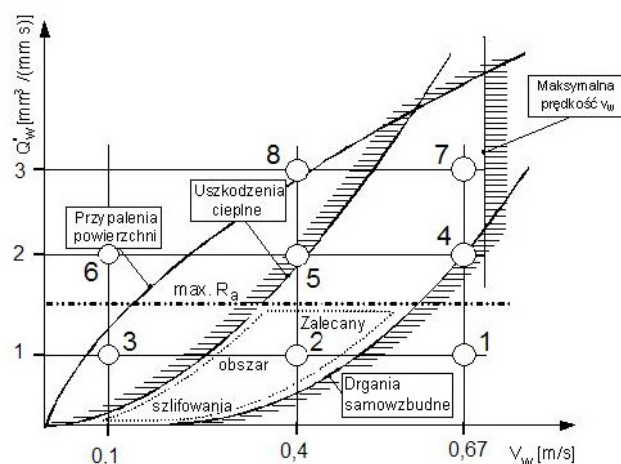
Moduł WA jest przeznaczony do przeprowadzenia pakietowej analizy falkowej sygnałów pomiarowych. Wybór sygnałów do analizy odbywa się na takiej samej zasadzie jak dla modułu FFT. W celu wykonania analizy użytkownik musi podać: typ falki, poziom dekompozycji, węzeł dekompozycji do analizy oraz typ współczynnika entropii określającego informatywność wybranego węzła. Wszystkie te parametry są wybierane przez użytkownika z rozwijanych menu. W wyniku przeprowadzonej analizy program wyświetla wybrane do analizy drzewo dekompozycji sygnału z wartościami entropii każdego węzła oraz wykres wartości współczynników entropii dla wybranego węzła dla kolejnych cykli szlifowania w okresie trwałości ściernicy. Ponadto użytkownik może obejrzeć jednocześnie wyświetlane wykresy współczynników falkowych wszystkich węzłów dla przyjętego planu dekompozycji. Wykresy te są wyświetlane w oknie będącym nakładką na główne okno programu. Ponadto cała analiza może być wykonana z usunięciem trendu według tych samych zasad jak dla modułu FFT. Wszystkie wyniki liczbowe są prezentowane w formie tabel i mogą być zapisane do plików tekstowych.

Moduły FFT i WA są tak opracowane, że pozwalają na szybkie przeprowadzenie analiz dla różnych wariantów ich parametrów celem wyboru wariantu najbardziej efektywnego.

4.2. Cel, warunki i zakres badań doświadczalnych

Celem badań była jakościowa ocena przydatności wielkości procesowych ustalonych w poprzednim rozdziale do nadzorowania szlifowania węgłnego w oparciu o przeprowadzone badania doświadczalne [Leża-10b]. Przyjmując metodologię *wrapper approach* (rozdział 2.3.1) za bardziej właściwą dla wielokryterialnej oceny stanu procesu, ocenę ilościową i selekcję miar sygnałów przeprowadzono w rozdziale następnym równoległe z klasyfikacją stanu procesu.

Aby zrealizować tak sformułowany cel badań przyjęto, że zakres zmian parametrów nastawnych powinien obejmować nie tylko cały zalecany obszar szlifowania, ale również powinien wykraczać poza ten obszar, aby możliwe było zdiagnozowanie zjawisk stanowiących ograniczenia procesu. W związku z tym badania przeprowadzono dla dosuwu i prędkości obwodowej przedmiotu, których wartości określone są przez współrzędne punktów od 1 do 8 na rys. 4.3. Zmiany tych parametrów podczas badań były realizowane poprzez zmiany właściwej wydajności objętościowej szlifowania Q_w oraz stosunku prędkości obwodowej ściernicy i przedmiotu q .



Rys. 4.3. Wartości właściwej wydajności objętościowej szlifowania Q'_w oraz prędkości obwodowej przedmiotu v_w (współrzędne punktów 1 do 8) stosowane podczas badań doświadczalnych szlifowania w głębnego na tle hipotetycznego zalecanego obszaru szlifowania

Przeprowadzono próby szlifowania w głębnego w seriach, dla których na początku ściernica była w pełni ostra tuż po obciążeniu, a na końcu w pełni zużyta. Oceny zużycia dokonywano na podstawie jego zewnętrznych objawów, przede wszystkim dźwiękowych, w oparciu o konsultacje z doświadczonym szlifierzem. Szlifowano w cyklach roboczych składających się z dosuwu roboczego bez wyiskrzania i z szybkiego wycofania ściernicy, każdorazowo zbierając naddatek wielkości 150 μm . Dla przedmiotu o średnicy około 100 mm i szerokości szlifowania 26 mm dawało to właściwy ubytek materiału obrabianego na jeden cykl roboczy około 50 mm^3/mm . W zależności od zastosowanych parametrów szlifowania, na pojedynczy okres trwałości ściernicy przypadało od 8 do 12 cykli roboczych, czyli od 400 do 600 mm^3/mm właściwego ubytku materiału obrabianego. Warunki przeprowadzonych badań doświadczalnych pokazano w tabeli 4.1.

W czasie prób rejestrowano cyfrowo sygnały pomiarowe składowych siły szlifowania, drgań oraz sygnał oryginalny emisji akustycznej i jego wartość skuteczną.

Pomiary sygnałów drgań i AE_{RMS} realizowano podczas każdej próby poprzez tę samą kartę pomiarową w systemie podziału czasu, w pakietach po 2048 próbek, co 1 sekundę, z częstotliwością próbkowania 10 kHz. Oznacza to, że możliwa była analiza tych sygnałów od częstotliwości 5 Hz do 5 kHz. W fazie badań wstępnych ustalono, że powyżej 5 kHz nie ma w widmie tych sygnałów istotnych składowych. Ponadto do analizy stosowano „sklejanie” tych pakietów, tworząc segmenty o długości 16384 próbek.

Tabela 4.1. Warunki i zakres badań doświadczalnych

Wielkość wejściowa	Wartość
Szlifierka	JOTES SWF 25 (opis w rozdz. 4.1)
Przedmiot szlifowany	Mat.: stal 38HMJ hartowana 52 HRC Średnica szlifowana: 100 mm Szerokość szlifowania: 26 mm
Ściernica	38A80KVBE firmy KORUND S.A.
Rodzaj obciążacza	Diamentowy jednopunktowy
Wskaźnik pokrycia k_d	Ok. 4
Liczba przejść obciążających	6
Prędkość szlifowania v_s	40 m/s
Właściwa wydajność objętościowa szlifowania Q_w	1; 2; 3 mm ³ /mms
Stosunek prędkości ściernicy do przedmiotu q	60; 100; 400
Cykl roboczy	dosuw roboczy, szybkie wycofanie ściernicy, naddatek 150 μm
Ciecz chłodząco-smarująca	3% emulsja olejowa

Oryginalny sygnał EA rejestrowano w sposób ciągły raz na co drugi cykl szlifowania z częstotliwością próbkowania 1 MHz, czyli z możliwością analizy widma do częstotliwości 500 kHz. Również w fazie badań wstępnych ustalono, że powyżej tej częstotliwości nie ma w widmie tego sygnału istotnych składowych. Oscyloskop LeCroy LT342L pozwala na rejestrację sygnałów z maksymalną częstotliwością równą 0,5 GHz, z zapisem w jego pamięci do 16 kB próbek. Pozwoliło to na analizę segmentów oryginalnego sygnału EA składających się z 10000 próbek.

Siły szlifowania rejestrowano podczas każdej próby w sposób ciągły z częstotliwością próbkowania 500 Hz. Częstotliwość ta była podyktowana pasmem przenoszenia układu pomiarowego składowych siły szlifowania sięgającym maksymalnie 300 Hz [Wrąb-93].

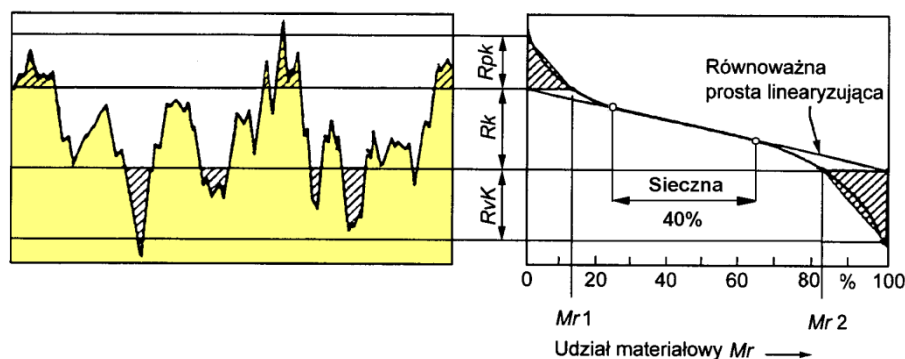
4.3. Bezpośrednie miary stanu czynnej powierzchni ściernicy

Pomiary parametrów zarysu topografii i faliści CPS wykonywano w celu bezpośredniej oceny stanu, odpowiednio – mikro- i makrogeometrii CPS. Umożliwiło to skorelowanie parametrów CPS z innymi parametrami stanu procesu szlifowania.

Dla wyznaczania parametrów rozkładu ostrzy w przestrzeni roboczej CPS (rys. 3.2) i faliści CPS stosuje się pomiar zarysu CPS prostopadle do jej obwiedni w kierunku równoległym do wektora prędkości szlifowania, czyli wzdłuż obwodu ściernicy [OcPo-86, Urba-02]. Pomiary takie wykonywano po każdych dwóch cyklach roboczych, co dla szlifowania przedmiotów o średnicy

około 100 mm jest równoznaczne z usunięciem 100 mm³ naddatku na 1 mm szerokości ściernicy. Profilogram wykonywano wzdłuż jednego śladu dowolnie położonego na szerokości ściernicy. Kierowano się w tym względzie wynikami podobnych pomiarów przeprowadzanych przez innych autorów [BrWe-92, Urba-02], z których wynika, że w przypadku szlifowania całą szerokością ściernicy nie wpływa to na powtarzalność wyników. Pomiar parametrów zarysu wykorzystano do opisu mikrogeometrii CPS za pomocą parametrów krzywej udziału materiałowego (rozdział 3.2.2) [LaLe-12, LeLa-04, WHKK-11].

Krzywa udziału materiałowego wyznaczona na długości przyjętego odcinka pomiarowego jest zastępowana opisem liniowym, który dzieli całkowitą wysokość profilu na trzy charakterystyczne wielkości: głębokość rdzenia chropowatości R_k , zredukowaną wysokość wzniesień R_{pk} i zredukowaną głębokość wgłębień R_{vk} . Suma wszystkich tych trzech parametrów to zredukowana wysokość profilu R_{Ges} (PN EN ISO 13565-2: 1999). Zasady wyznaczania wszystkich parametrów liniowego opisu krzywej udziału materiałowego ilustruje rys. 4.4.



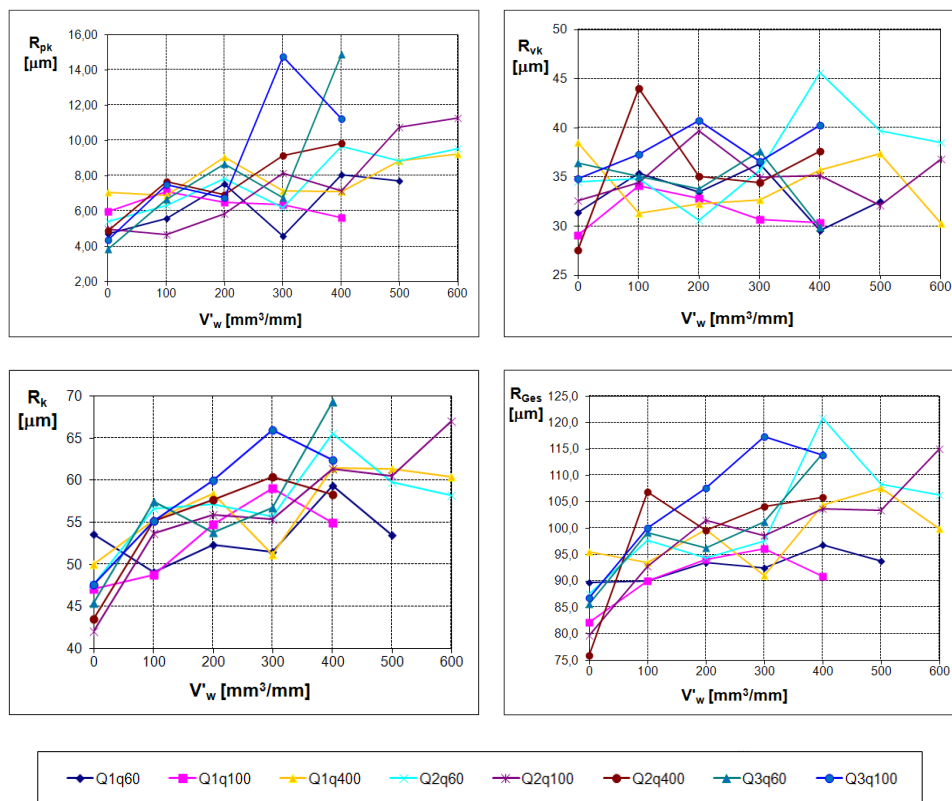
Rys. 4.4. Parametry liniowego opisu krzywej udziału materiałowego wg PN EN ISO 13565-2: 1999

Oprogramowanie stosowane podczas pomiarów zarysu topografii CPS obejmowało filtrację rejestrowanego sygnału w celu usunięcia zakłóceń pomiarowych, kontrolną wizualizację pomiarów i ich wstępne przetwarzanie umożliwiające bezpośrednie wyznaczanie wszystkich parametrów krzywej udziału materiałowego [LaLe-12, LeLa-04].

Na rys. 4.5 pokazano przebieg zmian parametrów R_{pk} , R_k , R_{vk} i R_{Ges} w funkcji wielkości właściwego ubytku materiału obrabianego V'_w .

Z przedstawionych wykresów wynika, że średnie wartości wszystkich parametrów, z wyjątkiem zredukowanej głębokości wgłębień R_{vk} , wykazują tendencję wzrostową wraz ze wzrostem usuniętego naddatku. Przyrost zredukowanej wysokości wzniesień R_{pk} i głębokości rdzenia chropowatości R_k i w konsekwencji wysokości całego profilu R_{Ges} CPS po zeszlifowaniu pewnej objętości materiału należy tłumaczyć przewagą zjawisk pęknięcia i wrywania

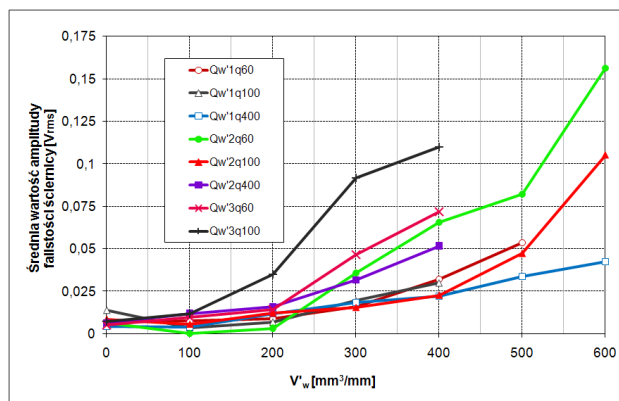
całych ziaren, czyli samoostrzenia nad zjawiskiem ścierania ziaren w procesie zużywania się ściernicy. Przyrosty te są na tyle regularne, że mogą być wykorzystane do oceny zmian zachodzących w mikrogeometrii CPS i do oceny formy zużywania się ściernicy. Jednak aby wykorzystać pomiar parametrów liniowego przedstawienia krzywej udziału materiałowego do oceny stanu ściernicy należy posługiwać się raczej trendem zmian tych parametrów niż ich wartościami chwilowymi. Podobne wyniki uzyskali w swojej pracy Brinksmeier i Werner [BrWe-92], stosując triangulacyjny czujnik laserowy pozwalający na szybkie pomiary profilu ściernicy na znacznie dłuższych odcinkach pomiarowych.



Rys. 4.5. Zmiana parametrów KUM zarysu profilu CPS w okresie trwałości ściernicy

Pomiary falistości CPS wykonywano podobnie jak pomiary zarysu jej profilu z tym, że na każdy pomiar 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

profilu CPS odpowiadają różnym częstościom fal na obwodzie ściernicy. Największe amplitudy falistości odnotowano w zakresie od 10 do 50 fal/obwód, dlatego jako miarę falistości CPS przyjęto średnią amplitudę widma mocy jej zarysu obwodowego w tym zakresie. Analizę wykonano za pomocą szybkiej transformaty Fouriera (ang. Fast Fourier Transform – FFT). Jej wyniki przedstawia rys. 4.6.



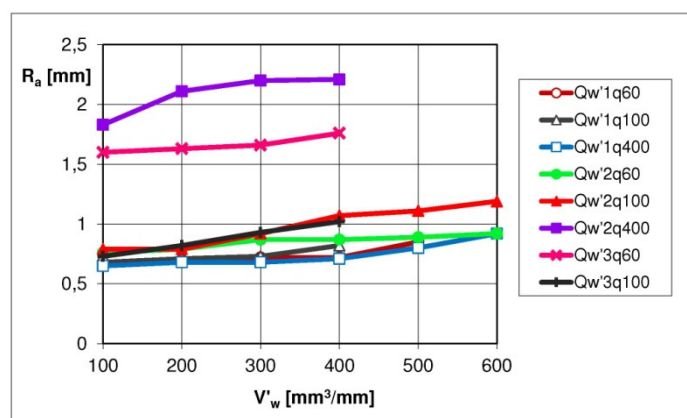
Rys. 4.6. Zmiany amplitudy falistości ściernicy w okresie jej trwałości

Wyniki prezentowane na rys. 4.6 potwierdzają wnioski z analizy stabilności dynamicznej procesu zamieszczanej w rozdziale 3.3. We wszystkich przypadkach kombinacji parametrów obróbki amplituda falistości CPS narasta wraz ze wzrostem objętości usuniętego materiału i rozwojem drgań samowzbudnych. Początkowo jej przyrost jest powolny, lecz po przekroczeniu pewnej ilości zeszlifowanego materiału falistość rośnie szybciej. Zużywanie się CPS powoduje spadek liczby ostrzy skutecznych, a tym samym wzrost przekroju wiórów przypadających na jedno ostrze i w konsekwencji wzrost sił przypadających na pojedyncze ostrze (równania 3.3 i 3.4). Kiedy powstałe naprężenia przekroczą wytrzymałość doraźną czy też zmęczeniową materiału ziarna lub spoiwa, dochodzi do wykruszenia ziarna, ewentualnie wyrwania go w całości, czyli do samoostrzenia ściernicy. Po zeszlifowaniu pewnej objętości materiału mechanizm ten zaczyna dominować i następuje przyspieszenie powstawania promieniowych ubytków CPS objawiających się falistością na obwodzie ściernicy. Podsumowując można powiedzieć, że falistość CPS będąca wynikiem rozwoju efektu regeneracyjnego drgań na ściernicy jest bardzo dobrym symptomem stanu makrogeometrii CPS. Jej nadmierny rozwój może prowadzić do bardzo niebezpiecznych skutków, dlatego wielkość amplitudy falistości CPS ma nadrzędne znaczenie w stosunku do wszystkich pozostałych kryteriów zużycia ściernicy.

4.4. Bezpośrednie miary stanu jakości przedmiotu szlifowanego

W celu bezpośredniej oceny stanu jakości przedmiotu szlifowanego wykonywano pomiary chropowatości oraz kształtu i faliści powierzchni szlifowanej po zakończeniu każdego z dwóch cykli roboczych. Metodykę pomiaru opisano w rozdziale 4.1. Umożliwiło to skorelowanie parametrów jakości przedmiotu szlifowanego z innymi parametrami stanu procesu szlifowania.

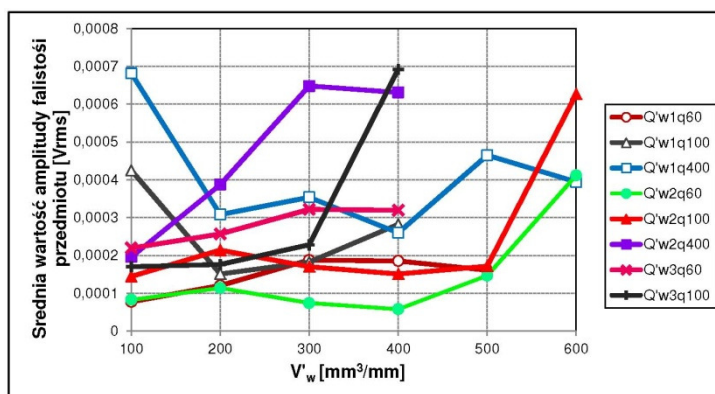
Wyniki pomiarów chropowatości powierzchni szlifowanej prezentuje rys. 4.7. Wynika z nich, że wzrost ubytku materiału obrabianego V_w od ostatniego obciążania ściernicy, czyli wzrost zużycia ściernicy, we wszystkich przypadkach powoduje wzrost chropowatości powierzchni przedmiotu nawet o około 40%. Zgadza się to z hipotezą zawartą w rozdziale 3.5 dotyczącym zagadnienia nadzorowania chropowatości, mówiącą że w praktyce, chropowatość prawie zawsze rośnie wraz ze wzrostem objętości usuniętego materiału. Ponadto, chropowatość rośnie wraz ze wzrostem wielkości dosuwu i spadkiem prędkości obwodowej przedmiotu. Szczególny wzrost chropowatości zanotowano dla prób o parametrach $Q'_w = 2 \text{ mm}^3/\text{mms}$ i $q = 400$. Dla wszystkich prób z tej serii wystąpiły jednocześnie wyraźne przypalenia powierzchni przedmiotu. Można przypuszczać, że parametry obróbki w tych próbach znalazły się powyżej krzywej przypaleń zalecanego obszaru szlifowania (rys. 4.3 – próba nr 6).



Rys. 4.7. Zmiany chropowatości powierzchni szlifowanej w okresie trwałości ściernicy

Tak jak w przypadku oceny faliści CPS, ocenę błędów kształtu i faliści zarysów profilu obwodowego przedmiotu po szlifowaniu wykonano w oparciu o ich analizę harmoniczną za pomocą FFT. Można przyjąć, że częstotliwości poniżej dziesięciu fal na obwód przedmiotu odpowiadają jego błędom kształtu, natomiast częstotliwości wyższe odpowiadają faliści [Nowi-91].

W związku z tym, w przeprowadzonej analizie, jako miarę falistości przedmiotu przyjęto średnią amplitudę widma mocy jego zarysu obwodowego w zakresie od 10 do 500 fal/obwód. Wyniki tej analizy przedstawia rys. 4.8.



Rys. 4.8. Zmiany falistości przedmiotu w okresie trwałości ściernicy

Jak można zauważyć, zmiany średniej wartości amplitudy falistości przedmiotu w funkcji właściwego ubytku materiału obrabianego nie są tak jednoznaczne jak w przypadku falistości ściernicy. Rozwój falistości przedmiotu jest dużo szybszy niż rozwój falistości ściernicy ze względu na dużo większą sztywność zużycia ściernicy. Jednakże amplituda progowa drgań samowzbudnych, powyżej której fale na przedmiocie są ścinane przez ściernicę, dla przedmiotu jest dużo niższa niż dla ściernicy. Powoduje to, że w miarę zużywania się ściernicy i rozwoju drgań samowzbudnych, fale o dużej amplitudzie nie mogą pojawiać się na przedmiocie, ponieważ są ścinane przez ściernicę (rozdział 3.3). Reszkowa falistość na przedmiocie jest zawsze mniejsza niż amplituda drgań samowzbudnych. Zjawisko to powoduje, że dla szlifowania wgłębnego kłowego zmiana amplitudy falistości na przedmiocie nie jest wiarygodnym symptodem zużycia CPS.

4.5. Nadzorowanie makrogeometrii CPS

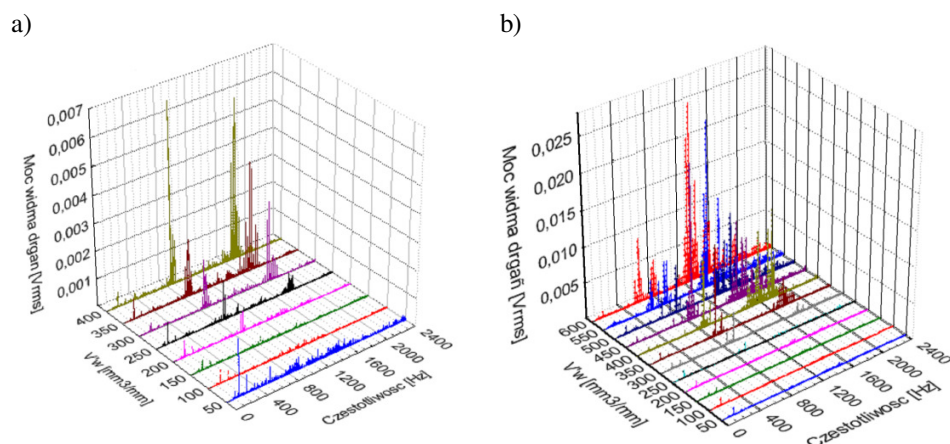
Jak wykazano w rozdziałach 3.3 i 4.3, stan makrogeometrii CPS jest bardzo silnie skorelowany z rozwojem drgań samowzbudnych. Detekcja drgań podczas szlifowania może być prowadzona za pomocą przetworników drgań, siły lub emisji akustycznej (rozdział 2). Do pomiaru drgań może być wykorzystany również mikrofon [Hamr-90, HMYU-04]. Pomiar taki narażony jest jednak na dodatkowe zakłócenia pochodzące ze środowiska obrabiarki i ostatnio nie jest raczej wykorzystywany. W niniejszej pracy wykorzystano pomiar przyspieszeń za pomocą piezoelektrycznego czujnika drgań oraz pomiar emisji akustycznej. Sposób wykonania pomiarów opisano w rozdziale 4.1.

Właściwości dynamiczne zastosowanego układu pomiaru siły szlifowania nie pozwalały mierzyć składowej dynamicznej tej siły powyżej 300 Hz, w związku z czym nie wykorzystywano tego pomiaru do detekcji drgań.

4.5.1. Wykorzystanie DFT do analizy sygnału drgań

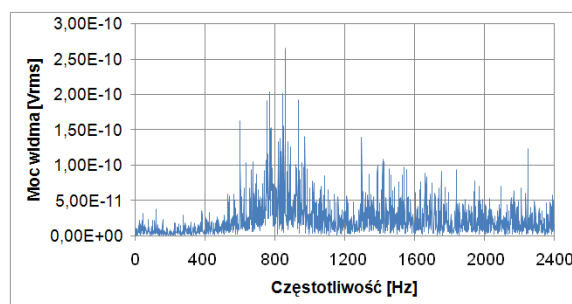
Najbardziej rozpowszechnioną metodą analizy cyfrowych sygnałów dynamicznych jakim jest sygnał drgań jest dyskretne przekształcenie Fouriera (DFT). Przekształcenie to jest bardzo sprawnym narzędziem analizy spektralnej szeregów czasowych, jednak analizowany sygnał powinien spełniać warunki liniowości i stacjonarności. W przypadku sygnału reprezentującego drgania mechaniczne (wibroakustyczne) generowane podczas szlifowania walcowego można przyjąć, że oba te warunki są spełnione. Wynika to z tego, że podstawowym źródłem drgań w tym szlifowaniu są okresowe wymuszenia związane z ruchem obrotowym przedmiotu i ściernicy (rozdział 3.3). Dopuszczalność takiego założenia potwierdzają też liczne prace badawcze poświęcone analizie drgań podczas szlifowania [Hamr-90, CRLM-96, InKL-01, TöFB-02, GBGK-02, AIWe-04]. W związku z tym, jako jedną z metod analizy częstotliwościowej sygnału drgań generowanego podczas szlifowania zastosowano FFT. Dla każdego pojedynczego cyklu szlifowania analizie poddawano segmenty składające się z 16384 próbek sygnału drgań.

Wykresy na rys. 4.9 pokazują przykłady rozwoju drgań w okresie trwałości ściernicy podczas szlifowania węgelnego z dwoma różnymi zestawami parametrów nastawnych. Drgania rozwijają się podobnie dla wszystkich pozostałych zestawów parametrów. We wszystkich przypadkach daje się zaobserwować wzrost amplitudy drgań w dwóch zakresach częstotliwości. Pierwszy z tych zakresów to 700-900 Hz, a drugi 1500-2000 Hz.

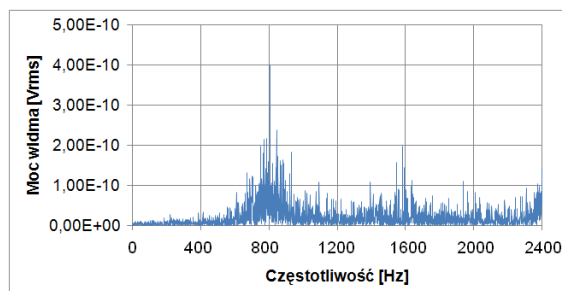


Rys. 4.9. Rozwój drgań w okresie trwałości ściernicy podczas szlifowania z różnymi parametrami: a) $Q'_w = 1 \text{ mm}^3/\text{mms}$, $q = 100$, b) $Q'_w = 2 \text{ mm}^3/\text{mms}$, $q = 60$

W celu sprawdzenia, czy zaobserwowane zakresy częstotliwości, dla których następuje wzrost amplitudy drgań obejmują częstotliwości własne układu OUPN, wykonano pomiar charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych tego układu. Pomiary wykonano za pomocą systemu PULSE typ 7700 firmy Brüel & Kjaer. Jest to system do analizy dźwięku i drgań składający się z czujnika drgań, młotka udarowego, kasy pomiarowej i oprogramowania, pozwalający na wykonanie analizy modalnej badanego obiektu. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów uzyskano obrazy widm amplitudowo-częstotliwościowych przy wymuszeniu impulsowym szlifowanego przedmiotu zamocowanego w kłach szlifierki oraz zespołu wrzeciennika ściernicy. Widma te pokazano odpowiednio na rys. 4.10 i 4.11.



Rys. 4.10. Widmo amplitudowo-częstotliwościowe przedmiotu szlifowanego przy wymuszeniu impulsowym

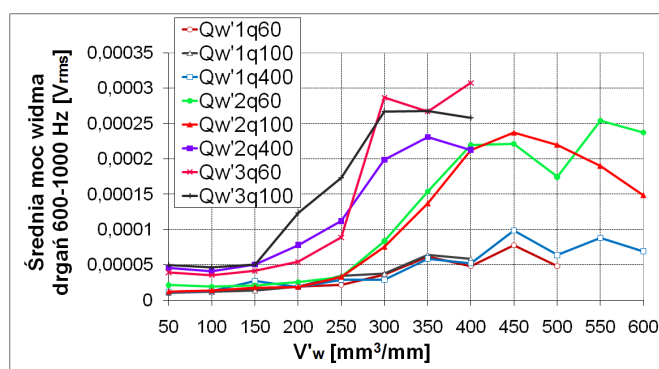


Rys. 4.11. Widmo amplitudowo-częstotliwościowe wrzeciennika ściernicy przy wymuszeniu impulsowym

Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe przedstawione na rys. 4.10 i 4.11 pozwalają stwierdzić, że częstotliwość własna przedmiotu szlifowanego wynosi około 800 Hz. Dla zespołu wrzeciennika ściernicy można wyróżnić dwie częstotliwości: 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 samowzbudnych podczas przeprowadzonych badań. Potwierdza to zasadę mówiącą, że częstotliwość drgań samowzbudnych jest zbliżona do częstotliwości drgań własnych układu OPN (rozdział 3.3). Jak udowodnił I. Inasaki [Inas-77] jest to częstotliwość własna najmniej sztywnego elementu układu OUPN, którym zwykle jest przedmiot. Należy zwrócić uwagę, że przy prędkości obrotowej ściernicy około 24 obr/s taka częstotliwość stanowi wymuszenie dla falistości ściernicy w liczbie około 33 fal/obwód, co potwierdza zakres najwyższych amplitud falistości CPS. Jednak w rozważanym przypadku, sprzężenie działania takich czynników jak kształt szlifowanego przedmiotu, miejsce wymuszenia ruchu drgającego przez proces szlifowania oraz wartości częstotliwości własnych przedmiotu i wrzeciennika ściernicy mogą powodować, że rozwój drgań samowzbudnych następuje także w zakresie drugiej częstotliwości własnej wrzeciennika, która jest również drugą harmoniczną drgań własnych przedmiotu. Oznacza to, że w praktyce monitorowanie drgań nie powinno ograniczać się tylko do zakresu częstotliwości obejmującego częstotliwość własną najmniej sztywnego elementu układu OUPN, ale również powinno być realizowane w zakresach obejmujących pozostałe częstotliwości własne układu OUPN.

Kierując się wnioskami wypływającymi 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. Wyniki przedstawiają wykresy na rys. 4.12 i 4.13.

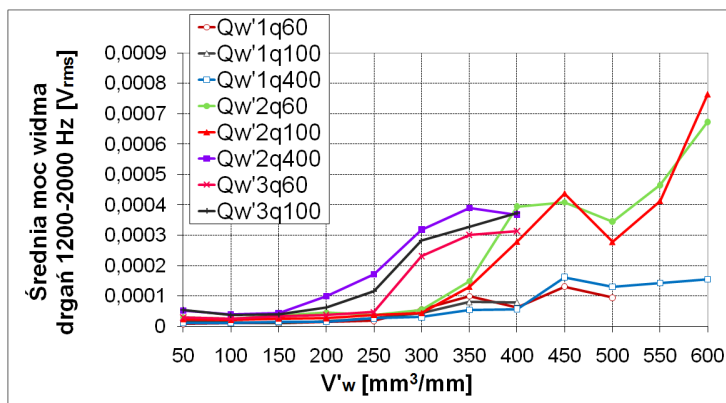


Rys. 4.12. Zmiany średniej wartości mocy widma drgań w okresie trwałości ściernicy w zakresie częstotliwości 600-1000 Hz

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 materiału, poziom drgań zaczyna szybko narastać i po osiągnięciu punktu przegięcia drgania narastają znacznie wolniej. Objętość właściwą zeszlifowanego materiału odpowiadającą temu punktowi przegięcia

można uznać za objętość wyznaczającą okres trwałości ściernicy ze względu na stan jej makrogeometrii. Położenie tego punktu zależy od zastosowanych parametrów szlifowania.

Zgodnie z wnioskami zawartymi w rozdziale 3.3, drgania rozwijają się szybciej dla większych głębokości szlifowania i mniejszych prędkości przedmiotu.



Rys. 4.13. Zmiany średniej wartości mocy widma drgań w okresie trwałości ściernicy w zakresie częstotliwości 1200-2000 Hz

4.5.2. Wykorzystanie transformaty falkowej do analizy sygnału drgań i EA

Transformata Fouriera zakłada, że analizowany sygnał jest liniowy i stacjonarny. Jak wspomniano na początku analizy sygnału drgań za pomocą DFT, założenie to jest dopuszczalne i często stosowane. Tym bardziej, że w przedstawionej analizie w rzeczywistości zastosowano tzw. krótkookresową DFT, dla której okno czasowe odpowiadało 16384 próbkom sygnałów zarejestrowanych podczas pojedynczych cykli szlifowania. Jednakże parametry procesu, a tym samym reprezentujące je sygnały pomiarowe, może charakteryzować nieliniowość i zmienność w czasie [BTCH-98, BAGH-06]. W przypadku sygnału drgań, głównie przyczynia się do tego nieliniowość sztywności strefy styku ściernicy z przedmiotem obrabianym [InKL-01]. Objawia się to rozproszeniem podwyższonych składowych widma sygnału wokół częstotliwości własnych układu oraz dryfowaniem tych częstotliwości. Oba te zjawiska można zaobserwować na wykresie z rys. 4.9b.

Nieliniowość i niestacjonarność sygnału ma większe znaczenie w przypadku emisji akustycznej. Wynika to z charakteru zjawisk będących źródłem tego sygnału. Z tego względu, w analizie sygnału EA, ale także sygnału drgań zasadne jest zastosowanie metod zakładających niestacjonarność i nieliniowość tych sygnałów. Jedną z takich metod jest wielorozdzielcza analiza czasowo-

-częstotliwościowa oparta o zastosowanie transformaty falkowej. Dotychczasowe zastosowania tej metody do ekstrakcji istotnych cech sygnałów pomiarowych w nadzorowaniu systemów obróbkowych wykazują, że może być ona bardziej efektywna niż klasyczna analiza częstotliwościowa [KwHa-04, LiCG-05, LHQB-06, LiYu-98, LTQB-07, TJJS-06, WaMK-01].

W transformacie falkowej [Biał-00] sygnał $f(t)$ jest dekomponowany na sumę ważoną funkcji lokalnych zwanych falkami. Funkcje falkowe muszą spełniać określone warunki, tzn. są to funkcje o skończonej, znormalizowanej energii, są skupione wokół wartości centralnej i ich wartość średnia wynosi zero. Ich postać graficzna przypomina krótką, narastającą, a następnie zanikającą falę, stąd nazwa: falki. Postać bazowa funkcji falkowej jest następująca:

$$\psi_{s,u} = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \quad s, u \in R, s > 0 \quad (4.1)$$

gdzie: s jest współczynnikiem skali decydującym o długości falki, odwrotnie proporcjonalnym do częstotliwości środkowej lub tzw. pseudoczęstotliwości falki, natomiast u jest współczynnikiem przesunięcia falki w osi czasu. Właściwości lokalne sygnału $f(t)$ mogą być zatem identyfikowane w zależności od przyjętej skali i przesunięcia zastosowanych do analizy tego sygnału.

Ciągła transformata falkowa (ang. continuous wavelet transform – CWT) jest definiowana w następujący sposób:

$$W_f(s,u) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^*\left(\frac{t-u}{s}\right) dt \quad (4.2)$$

$W_f(s,u)$ jest miarą zmienności funkcji $f(t)$ w otoczeniu u o rozmiarze s , i podobnie jak w przypadku transformaty Fouriera, jest ona proporcjonalna do stopnia skorelowania wartości sygnału czasowego z zastosowaną falką. Wadą CWT jest wysoka nadmiarowość wynikająca z nieograniczonej liczby generowanych współczynników. Aby temu zapobiec wprowadzono dyskretną transformatę falkową (ang. discrete wavelet transform – DWT). W DWT stosuje się skończony krok próbkowania płaszczyzny czasowo-częstotliwościowej, przyjmując:

$$s = 2^j, u = k2^j, \text{ gdzie: } j, k - \text{liczby całkowite} \quad (4.3)$$

Otrzymuje się w ten sposób diadyczną skalę próbkowania, w której dwukrotne zwiększenie rozdzielczości względem czasu powoduje dwukrotne zmniejszenie rozdzielczości względem częstotliwości. Dodatkowo, aby umożliwić odtworzenie oryginalnej funkcji $f(t)$ dla skal odpowiadających częstotliwościom bliskim zeru, dla każdego rodzaju falki wprowadza się odpowiadającą jej funkcję skalującą $\phi_{j,k}(t)$. Funkcję skalującą można traktować jako odpowiedź impulsową filtru dolnoprzepustowego, natomiast falkę – filtru

pasmowego. Wówczas sygnał $f(t)$ może być przedstawiony jako suma funkcji skalujących i falek, tworzących rodzinę funkcji ortogonalnych.

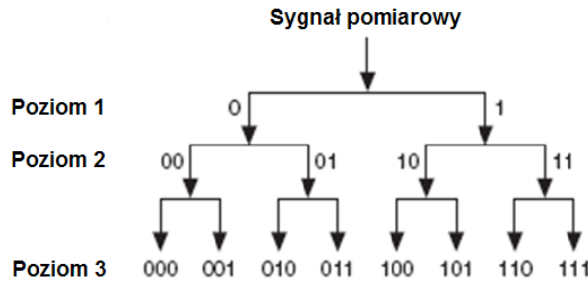
Jeśli $x(n)$ jest dyskretną postacią sygnału $f(t)$, a $g_j(n-2^j k)$ jest dyskretnym ekwiwalentem falki i $h_j(n-2^j k)$ jest jej tzw. sekwencją skalującą, to DWT oblicza współczynniki falkowe $c_{j,k}$ i $d_{j,k}$ według zależności:

$$c_{j,k} = \sum_n x(n)h_j(n-2^j k) \quad \text{ i } \quad d_{j,k} = \sum_n x(n)g_j(n-2^j k) \quad (4.4)$$

Na j -tym poziomie rozdzielczości współczynniki $c_{j,k}$ prezentują tzw. przybliżenie sygnału, czyli sygnał z poziomu poprzedniego po filtracji dolno-przepustowej, a $d_{j,k}$ prezentują szczegóły sygnału, czyli sygnał z poziomu poprzedniego po filtracji górnoprzepustowej. Współczynniki te dla kolejnych poziomów rozdzielczości wyznacza się według następujących zależności:

$$c_{j-1,k} = \sum_n h(n-2k)c_{j,k} \quad \text{ i } \quad d_{j-1,k} = \sum_n g(n-2k)d_{j,k} \quad (4.5)$$

W ten sposób DWT jest niczym innym jak przetwarzaniem sygnału za pomocą tzw. banku dolno- i górnoprzepustowych oktaowych filtrów. Jeśli przetwarzanie to obejmie na każdym poziomie rozdzielczości zarówno część dolnoprzepustową jak i górnoprzepustową, to nazywane jest ono pakietową analizą falkową (ang. wavelet packet analysis – WPA). Schemat takiej analizy do poziomu 3-go pokazuje rys. 4.14. 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. 4.14. Schemat pakietowej analizy falkowej do poziomu 3-go
0 – składowa dolnoprzepustowa, 1 – składowa górnoprzepustowa

Pakietowa analiza falkowa jest więc liniową kombinacją falek, które współczynniki są wyznaczane za pomocą algorytmu rekursywnego wymagającego zwykle mniejszej ilości obliczeń niż analiza Fouriera. Ponadto umożliwia ona szybkie wyznaczenie istotnych pasm częstotliwości obecnych w sygnale i odfiltrowanie zakłóceń. Wszystkie te cechy powodują, że jest to bardzo efektywne narzędzie analizy sygnałów pomiarowych.

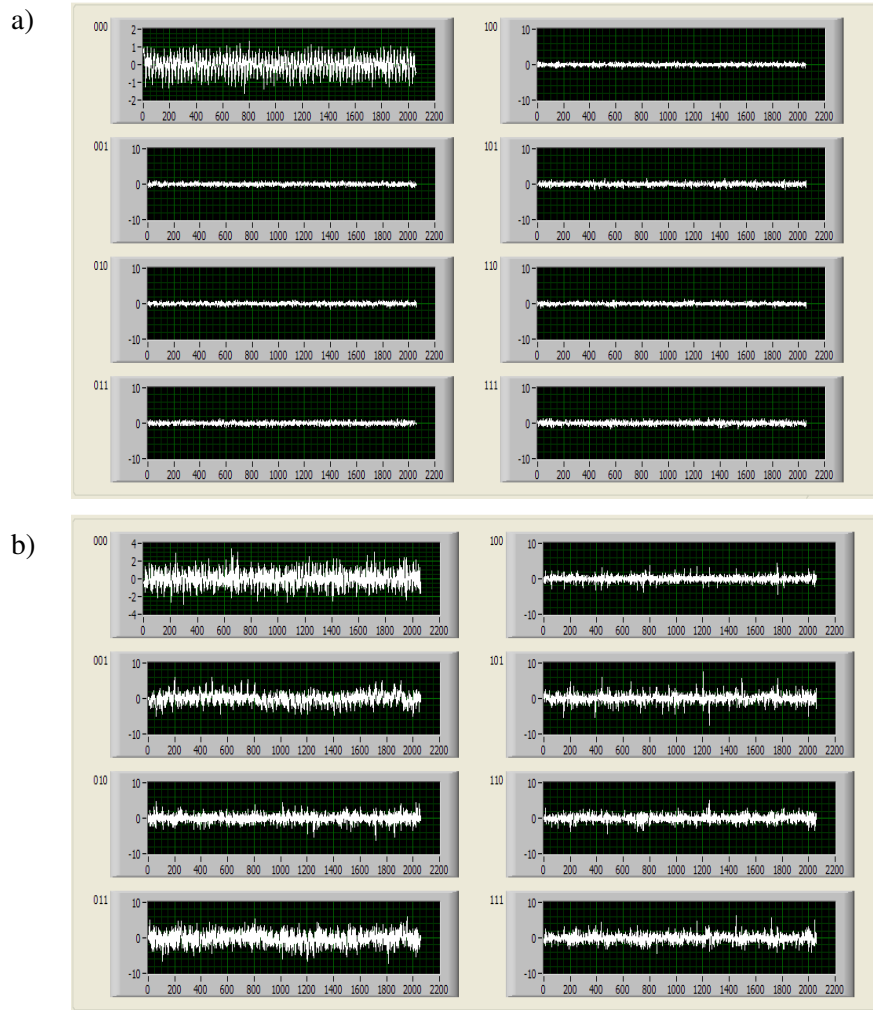
Przeprowadzenie analizy falkowej wymaga dobrania jej parametrów oddzielnie dla każdego sygnału. Po pierwsze, należy dobrać rodzaj falki podstawowej i długości jej nośnika. Znanych i powszechnie stosowanych jest kilka rodzajów falek. Wybór falki powinien być kompromisem pomiędzy liczbą zerowych momentów a długością nośnika falki (skali). Wybór falki o dużej liczbie momentów zerowych przyczynia się do wzrostu liczby małych współczynników falkowych. Pożądana jest również liniowa faza i płaska charakterystyka w paśmie przepustowym falki i jej funkcji skalującej. Warunki te spełniają najlepiej falki symlet i biortogonalne [Biał-00]. Następnie należy ustalić poziom rozdzielczości analizy, czyli skalę. Zależy on od charakterystyki sygnału, ale zwykle nie stosuje się poziomów wyższych niż 4-5. Oczywiście im wyższy poziom rozdzielczości, tym wyższa złożoność obliczeniowa analizy. Kolejnym ważnym elementem jest wybór odpowiedniej miary dobrze charakteryzującej stopień skorelowania dekompozycji falkowej z monitorowaną cechą procesu. Miary te są zwykle oparte o wyznaczanie cech statystycznych lub różnie zdefiniowanych współczynników entropii otrzymanych transformat falkowych. Najczęściej wszystkie parametry analizy falkowej ustalane są doświadczalnie [Biał-00].

Dalej przedstawiono wyniki zastosowania pakietowej analizy falkowej do sygnału drgań i sygnału wartości skutecznej emisji akustycznej do oceny zdolności skrawanej ściernicy. Parametry tej analizy ustalono doświadczalnie w ten sposób, że przeprowadzono analizy dla kolejnych kombinacji rodzaju falek, skali i typu entropii i wybierano zestaw dający najlepsze wyniki. W przypadku obu analizowanych sygnałów wybrano falę Symlet 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.

Rys. 4.15 przedstawia wykresy współczynników falkowych dla każdego poziomu rozdzielczości, uzyskane w wyniku analizy sygnału drgań podczas szlifowania ściernicą tuż po obciążeniu i szlifowania ściernicą całkowicie zużytą dla serii prób przeprowadzonej z $Q_w' = 2 \text{ mm}^3/\text{mms}$ i $q = 60$.

Rys. 4.15a prezentuje wartości współczynników falkowych dla ściernicy o pełnej zdolności skrawnej po zeszlifowaniu $50 \text{ mm}^3/\text{mm}$ materiału, natomiast rys. 4.15b – dla całkowicie zużytej ściernicy po zeszlifowaniu $600 \text{ mm}^3/\text{mm}$ materiału. Oś rzędnych każdego wykresu reprezentuje 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 w zakresie 0-625 Hz. Oś odciętych na wykresach reprezentuje czas wyrażony liczbą próbek sygnału tak, że każda składowa jest reprezentacją sygnału w danym zakresie częstotliwości na całej długości jego trwania.



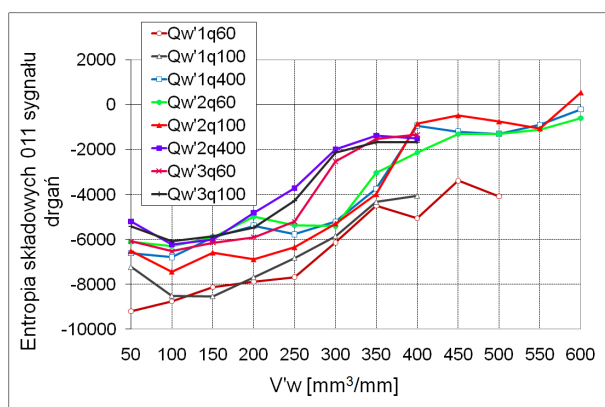
Rys. 4.15. Wyniki analizy za pomocą falki Symlet 8 na poziomie $j = 3$ sygnału drgań dla serii prób z $Q_w' = 2 \text{ mm}^3/\text{mms}$ i $q = 60$. Wykresy współczynników falkowych dla ściernicy: a) o pełnej zdolności skrawnej po zeszlifowaniu $50 \text{ mm}^3/\text{mm}$ materiału, b) dla całkowicie zużytej ściernicy po zeszlifowaniu $600 \text{ mm}^3/\text{mm}$ materiału

Z rys. 4.15a widać, że sygnał drgań podczas szlifowania ostrą ściernicą może być scharakteryzowany za pomocą współczynników wyłącznie naj-

niższego zakresu częstotliwości, czyli dla najniższej skali analizy. Współczynniki dla wyższych skal są bardzo małe i mogą nie być brane pod uwagę. Natomiast podczas szlifowania ściernicą zużytą (rys. 4.15b) można zauważyć wyraźny wzrost energii współczynników falkowych dla wyższych skal rozkładu, szczególnie dla 001 i 011. W tym przypadku jest to łatwo wytłumaczalne, ponieważ odpowiadają one zakresowi częstotliwości 1-szej i 2-ej harmonicznej częstotliwości drgań własnych przedmiotu szlifowanego i wrzeciennika ściernicy, wokół których następuje rozwój drgań samowzbudnych.

Pokazany przykład analizy falkowej sygnału drgań jest typowy również dla innych sygnałów pomiarowych.

Największą zmianę entropii sygnału drgań dla wszystkich prób szlifowania zaobserwowano dla składowej 011, czyli w zakresie częstotliwości 1875-2500 Hz. Pokazują to wykresy na rys. 4.16.

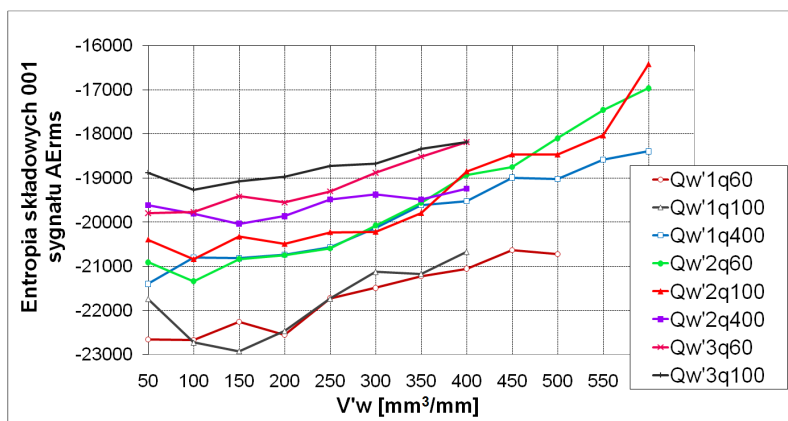


Rys. 4.16. Zmiana entropii składowych 011 sygnału drgań w funkcji właściwego ubytku materiału obrabianego

Dla wszystkich prób, wraz ze wzrostem właściwego ubytku materiału obrabianego, a zatem ze wzrostem zużycia ściernicy, następuje wyraźny przyrost współczynnika entropii. A zatem, wartość tego współczynnika może być dobrą miarą stanu zdolności skrawnej ściernicy. Zakres częstotliwości 1875-2500 Hz częściowo odpowiada drugiej harmonicznej częstotliwości drgań własnych wrzeciennika ściernicy. Fakt, że amplituda drugiej harmonicznej jest wyższa niż pierwszej, jak już wspomniano wcześniej, można wytłumaczyć splotem działania takich czynników jak kształt szlifowanego przedmiotu, miejsce wymuszenia ruchu drgającego przez proces szlifowania oraz wartości częstotliwości własnych przedmiotu i wrzeciennika ściernicy.

Na rys. 4.17 pokazano zmiany entropii sygnału wartości skutecznej emisji akustycznej AE_{RMS} . Największe zmiany dla wszystkich prób szlifowania odnotowano dla składowej 001, czyli dla zakresu częstotliwości 625-1250 Hz.

Charakter zmian jest podobny do zmian entropii dla sygnału drgań, chociaż względne przyrosty entropii są mniejsze. Zmiany wartości skutecznej emisji akustycznej wraz ze wzrostem właściwego ubytku materiału obrabianego należy wiązać ze spadkiem liczby ostrzy skrawających na czynnej powierzchni ściernicy. W przypadku przewagi samoostrzenia w zużyciu ściernicy, co miało miejsce podczas większości prób, zmiany te mają charakter losowy i powodują, że sygnał jest mocno niestacjonarny. Stąd wynika skuteczność analizy falkowej w przypadku tego sygnału.



Rys. 4.17. Zmiana entropii składowych 001 sygnału wartości skutecznej emisji akustycznej w funkcji właściwego ubytku materiału obrabianego

Wyniki zastosowania pakietowej analizy falkowej do sygnału drgań są podobne do wyników otrzymanych z analizy za pomocą FFT. Poziom wartości współczynników falkowych znacznie bardziej zależy od parametrów szlifowania niż poziom średniej mocy widmowej sygnału drgań. Jednak przebieg zmian i względny przyrost wartości współczynników dla obu transformat jest podobny z wyjątkiem szlifowania z małymi wartościami właściwej wydajności objętościowej. Dla $Q'_w = 1 \text{ mm}^3/\text{mms}$ względny przyrost mocy widma drgań w okresie trwałości ściernicy jest stosunkowo niewielki, natomiast przyrost entropii współczynników falkowych jest równie wyraźny jak dla pozostałych, wyższych wydajności objętościowych. Może to wskazywać na większą efektywność wykrywania makrozużycia ściernicy w oparciu o analizę sygnału drgań za pomocą transformaty falkowej niż za pomocą FFT.

Względny przyrost entropii współczynników falkowych sygnału AE_{RMS} jest bardziej równomierny w całym okresie trwałości ściernicy, chociaż nie tak duży jak dla mocy widma drgań. Może to powodować trudności w określeniu końca trwałości ściernicy. Odwrotnie niż dla mocy widma drgań, przyrost wartości entropii współczynników falkowych dla wyższych parametrów szlifowania jest

mniejszy niż dla parametrów niższych. Ponadto poziom wartości współczynników falkowych silnie zależy od zastosowanych parametrów szlifowania.

4.5.3. Korelacja wybranych miar stanu makrogeometrii CPS z jej falistością

Zgodnie z analizą bezpośrednich miar stanu czynnej powierzchni ściernicy zawartą w rozdziale 4.3, bardzo dobrym symptomem stanu makrogeometrii CPS jest wielkość amplitudy jej falistości będącej efektem rozwoju efektu regeneracyjnego drgań. Zatem miara pośrednia stanu makrogeometrii CPS powinna być dobrze skorelowana z falistością. W celu wyznaczenia siły powiązania pomiędzy amplitudą falistości CPS a wybranymi miarami stanu jej makrogeometrii wyznaczono współczynniki korelacji liniowej Pearsona między zmiennymi reprezentującymi te wielkości w funkcji właściwego ubytku materiału obrabianego (rys.: 4.6 oraz 4.12, 4.13, 4.16 i 4.17). Wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Współczynnik korelacji liniowej amplitudy falistości CPS z wybranymi miarami stanu jej makrogeometrii

Parametry szlifowania	Współczynnik korelacji liniowej amplitudy falistości CPS z:			
	Śr. mocą widma drgań 600-1000 Hz	Śr. mocą 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

Większość wyznaczonych 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. Wyniki te potwierdzają dużą przydatność miar stanu makrogeometrii CPS zawartych w tabeli 4.2 do oceny tego stanu.

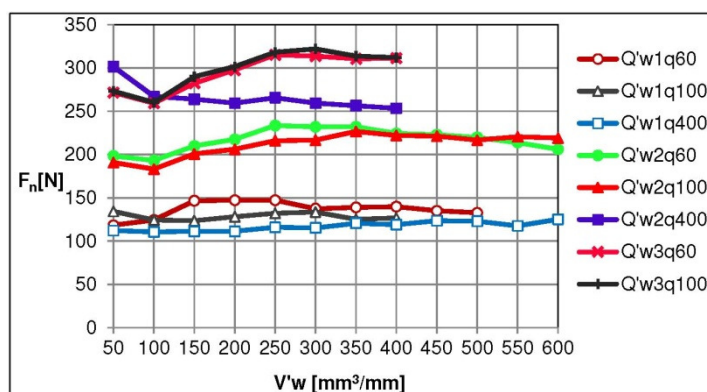
Wcześniej przeprowadzona szczegółowa analiza tych miar wykazała jednak zróżnicowaną zależność poszczególnych miar od objętości usuniętego materiału i zastosowanych wielkości nastawnych. Dlatego byłoby najkorzystniej, aby proces podejmowania decyzji o stanie makrogeometrii CPS był procesem wielokryterialnym, uwzględniającym wszystkie omawiane miary.

4.6. Nadzorowanie mikrogeometrii CPS

Analiza mikrogeometrii CPS przedstawiona w rozdziale 3.2.2 wykazała, że następujące w okresie trwałości ściernicy zmiany parametrów mikrogeometrii CPS mają wpływ na wielkość składowych siły szlifowania w ich części przypadającej na pokonanie sił tarcia ziaren o powierzchnie przedmiotu i wiórów. Wskazuje to na możliwość nadzorowania zdolności skrawnej ściernicy w części związanej z parametrami mikrogeometrii CPS poprzez pomiar siły szlifowania. Ponadto analiza literatury wskazuje na związek sygnału emisji akustycznej z tymi parametrami (rozdział 2.3.4 i 3.2.2).

4.6.1. Wykorzystanie pomiaru składowych siły szlifowania

Na rys. 4.18 i 4.19 pokazano zmiany odpowiednio składowej normalnej i stycznej siły szlifowania w okresie trwałości ściernicy podczas szlifowania wgłębnego z różnymi parametrami. Dla wszystkich zastosowanych parametrów szlifowania zależność obu składowych od objętości właściwej zeszlifowanego materiału jest stosunkowo niewielka.

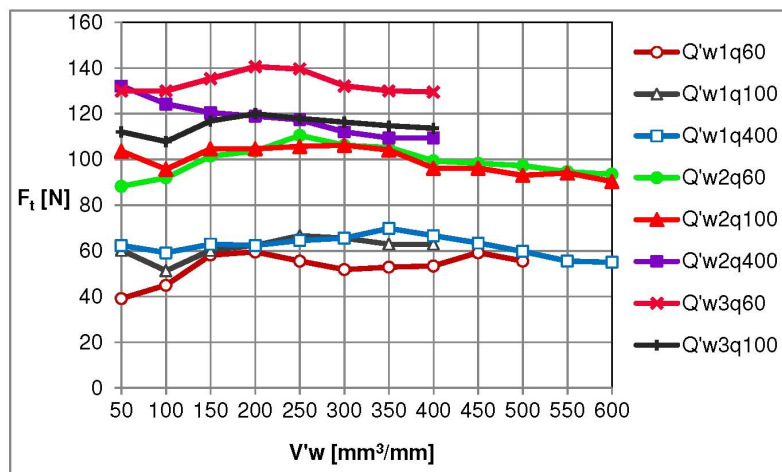


Rys. 4.18. Zmiany składowej normalnej siły szlifowania w okresie trwałości ściernicy

Poszukując ogólnej zasady dla przebiegu tych zależności można zauważyć, że wartość składowej normalnej po pierwszym cyklu obróbkowym zmniejsza się (co jest prawdopodobnie związane z „dotarciem się” ściernicy po obciążeniu), a następnie zaczyna powoli rosnąć dla kolejnych cykli aż do wystąpienia samoostrzenia, kiedy osiąga wartość mniej więcej stałą. Taki przebieg zużycia ściernicy jest typowy dla wystąpienia przewagi samoostrzenia, dla którego mimo postępującego zużycia bryły ściernicy (makrozużycia) utrzymuje się stała zdolność skrawna związana z mikrozużyciem (rozdział 2.3.2 – rys. 2.6). Dająca się zaobserwować w większości przypadków niemonotoniczność przebiegu

składowych siły pod koniec okresu trwałości ściernicy również świadczy o wystąpieniu samoostrzenia.

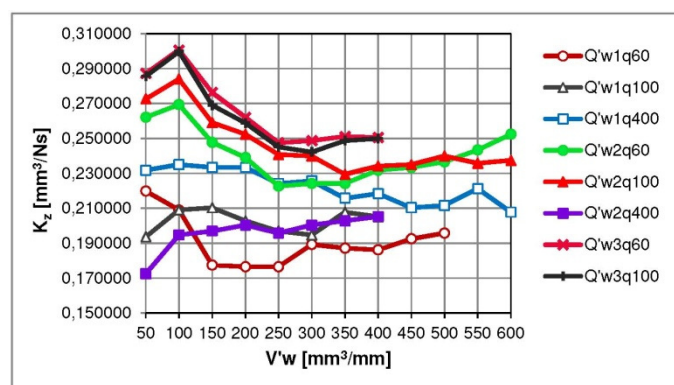
Przebieg zmian składowej stycznej – rys. 4.19 – jest podobny, z tym że wartości tej składowej po osiągnięciu pewnej wartości maksymalnej zaczynają maleć. Świadczy to o zmniejszeniu się sumarycznej powierzchni starcia ostrzy dla większej objętości właściwej zeszlifowanego materiału, czyli o wykruszaniu i pękaniu ziaren oraz o zmianach w parametrach mikrogeometrii CPS charakterystycznych dla samoostrzenia (rozdział 3.2.2, zależności 3.29 i 3.30).



Rys. 4.19. Zmiany składowej stycznej siły szlifowania w okresie trwałości ściernicy

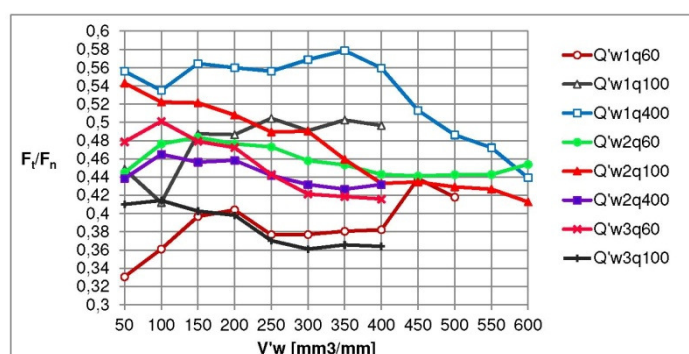
Wartości składowych siły szlifowania mogą być również podstawą wyznaczenia wskaźników stanu ściernicy. Powszechnie stosowany jest stosunek wydajności objętościowej szlifowania do wartości składowej normalnej K_z określany jako współczynnik zdolności skrawnej ściernicy oraz stosunek składowej stycznej do składowej normalnej μ .

Na rys. 4.20 pokazano wyniki badań przedstawiające zależność współczynnika zdolności skrawnej K_z od objętości właściwej zeszlifowanego materiału. Dla wyższych wartości właściwej wydajności szlifowania, przebieg zmian tego współczynnika w okresie trwałości ściernicy wskazuje na wystąpienie przewagi zużycia ściernicy przez samoostrzenie. Po początkowym wzroście jego wartości („docieranie” się ściernicy) następuje systematyczny spadek współczynnika zdolności skrawnej ściernicy, charakterystyczny dla zużycia ściernego. Trwa on do chwili wystąpienia wykruszania i pękania ziaren, czyli do rozpoczęcia intensywnego samoostrzenia. Wówczas wartość współczynnika K_z się stabilizuje, a nawet wzrasta. Dla małej właściwej wydajności szlifowania i bardzo małej prędkości przedmiotu ($q = 400$), kiedy dominuje ścierne zużycie ściernicy, współczynnik ten zmienia się w mniejszym zakresie.



Rys. 4.20. Zmiany współczynnika zdolności skrawnej K_z w okresie trwałości ściernicy

Na rys. 4.21 przedstawiono jak w czasie przeprowadzonych badań doświadczalnych zmieniał się stosunek składowej stycznej do składowej normalnej siły szlifowania. Zmiany te są dość nieregularne i w związku z tym trudne do interpretacji. Wynika to prawdopodobnie z dużego wpływu stosunku prędkości ściernicy do prędkości przedmiotu na stosunek składowych siły oraz z losowego wpływu wykruszania i pęknięcia ziaren, czyli samoostrzenia ściernicy, na stosunek składowych siły. Wystąpienie intensywnego samoostrzenia może ten stosunek zarówno znacznie obniżyć, jak i podwyższyć.



Rys. 4.21. Zmiany stosunku składowej stycznej do normalnej w okresie trwałości ściernicy

Analizowane miary związane z siłą szlifowania nie wykazują wyraźnej korelacji z żadnym z parametrów krzywej udziału materiałowego CPS (rys. 4.5).

Świadczy to o tym, że miary te samodzielnie nie mogą stanowić wiarygodnych symptomów stanu mikrogeometrii CPS. Brak jest również korelacji składowych siły szlifowania i wskaźników na nich opartych z chropowatością powierzchni przedmiotu reprezentującą jakość przedmiotu po szlifowaniu.

Dla każdych badanych warunków szlifowania, chropowatość monotonicznie wzrasta wraz z objętością zeszlifowanego materiału (rys. 4.7). Jest to zgodne z sugestią zawartą w rozdziale 3.6 mówiącą, że w miarę upływu okresu trwałości ściernicy chropowatość rośnie ze względu na nieuchronny rozwój drgań samowzbudnych.

Analiza wyników doświadczalnych przebiegu zmian składowych siły szlifowania, ich stosunku oraz współczynnika zdolności skrawnej ściernicy w okresie trwałości ściernicy oraz brak korelacji tych zmian z bezpośrednimi miarami stanu CPS i chropowatością przedmiotu wskazują na brak możliwości wiarygodnego nadzorowania stanu mikrogeometrii CPS na podstawie miar wyprowadzanych wyłącznie z sygnałów pomiarowych składowych siły szlifowania. Miary te jednak mogą być z pożytkiem stosowane jako składowe wektora wejściowego w modelu stanu procesu uwzględniającym również inne symptomy tego stanu.

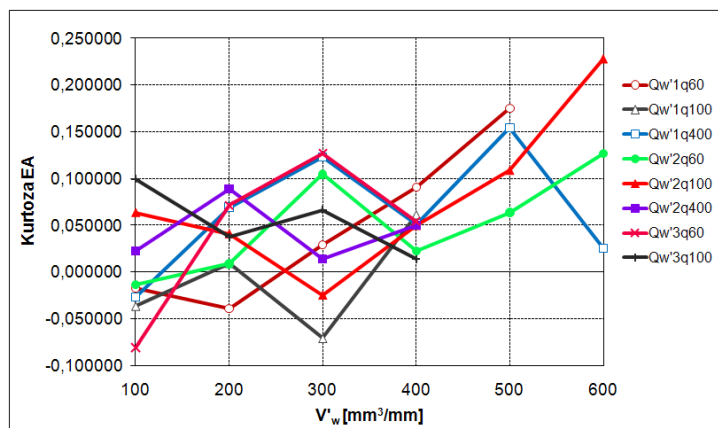
4.6.2. Wykorzystanie pomiaru emisji akustycznej

Analiza źródeł powstawania sygnału emisji akustycznej wskazuje, że z parametrami mikrogeometrii CPS powinna być skorelowana charakterystyka tego sygnału. Można się spodziewać, że związki pomiędzy parametrami rozkładu ziaren na CPS a wybranymi cechami sygnału EA będą bardziej widoczne dla sygnału oryginalnego niż wartości skutecznej EA. Z definicji, wartość skuteczna uśrednia wartości kolejnych próbek sygnału, czyniąc sygnał mało wrażliwym na zdarzenia krótkotrwałe, takie np. jak pękanie 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 [KaDo-82, Urba-02, Liao-10].

Jedną z takich miar jest kurtoza, która jest miarą skupienia rozkładu wartości sygnału wokół wartości średniej. Wykresy na rys. 4.22 pokazują zmiany wartości kurtozy sygnału EA wraz ze wzrostem właściwej objętości zeszlifowanego materiału od początku okresu trwałości ściernicy.

Średnio wartości kurtozy wzrastają, a więc skupienie rozkładu wartości sygnału EA wokół wartości średniej wzrasta wraz ze zużyciem ściernicy. Potwierdza to wyniki otrzymane przez P. Sutowskiego i S. Plichtę [SuPl-04]. Wyjątek stanowi przypadek szlifowania z $Q'_w = 2 \text{ mm}^3/\text{mms}$ i $q = 400$, dla którego wskaźniki B_p wynosiły około 2 i po wszystkich cyklach szlifowania składających się na okres trwałości ściernicy stwierdzono wystąpienie przypaleń. 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, które zachodzą w przedmiocie, kiedy wskaźnik B_p przekracza wartość 0,5 (rozdział 3.4), mają wpływ na generowany przez proces szlifowania sygnał EA, zakłócając zachodzące w nim zmiany spowodowane zużyciem mikrogeometrii ściernicy. Oznacza to, że kurtoza EA

nie jest dobrą miarą zużycia ściernicy w przypadku występowania uszkodzeń cieplnych i przypaleń. Wyjaśnia to również nieskuteczność prób zastosowania tej miary do wykrywania przypaleń [WWAW-01].



Rys. 4.22. Zmiany wartości kurtozy EA w okresie trwałości ściernicy

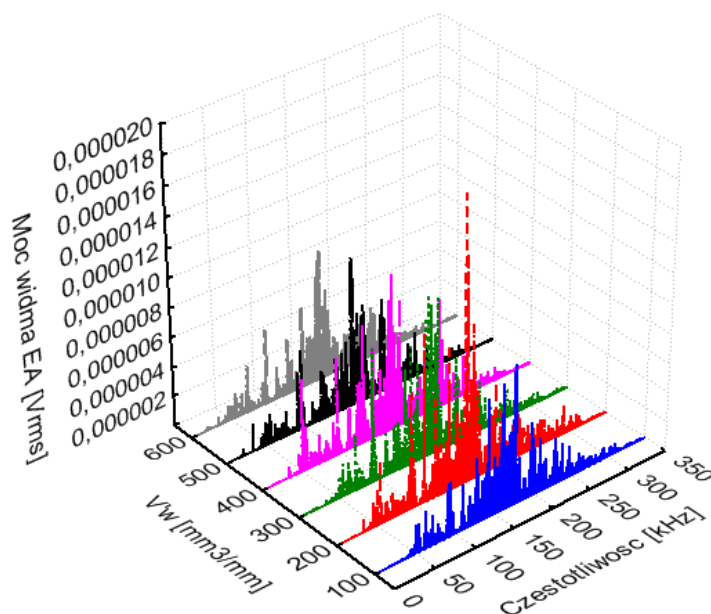
Wzrost kurtozy sygnału EA wraz z upływem okresu trwałości ściernicy można wytłumaczyć spadkiem liczby ostrzy skutecznych na jednostkę powierzchni CPS w wyniku jej zużycia. W efekcie spada amplituda oraz liczba pików w sygnale EA i sygnał ten staje się bardziej skupiony wokół swojej wartości średniej. I. Inasaki [Inas-98] uważa, że w większości przypadków zmiany w sygnale EA są znacznie bardziej znamienne niż zmiany w sygnale mocy szlifowania. Zatem zmiana kurtozy sygnału EA może być wykorzystana w ocenie stanu zdolności skrawnej ściernicy, z wyjątkiem przypadków występowania uszkodzeń cieplnych i przypaleń.

Źródłem sygnału EA są pulsacje generowane w strefie tworzenia wióra, które traktowane są jak ciągły sygnał o charakterze drgań (rozdział 2.3.4). W związku z tym sygnały EA poddano analizie spektralnej.

Analiza DFT zarejestrowanych w czasie przeprowadzonych badań sygnałów EA wykazuje zwiększoną ich moc w szerokim zakresie od około 50 do 300 kHz. Rys. 4.23 przedstawia typowy przebieg zmian widma sygnału EA w okresie trwałości ściernicy.

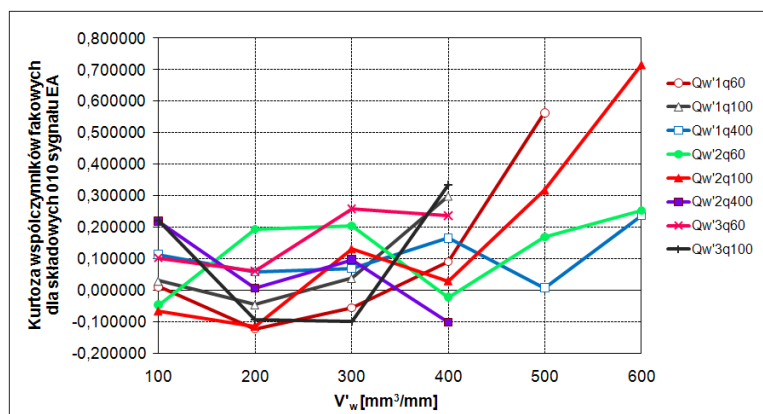
Wyniki na rys. 4.23 są potwierdzeniem wyników wcześniejszych badań autora tej pracy w zakresie zastosowania EA w diagnostyce procesu szlifowania wgłębnego kłowego [LeLa-98, LeLa-99]. Zaobserwowano wówczas dwa charakterystyczne zakresy częstotliwości, związane z dwiema różnymi grupami zjawisk zachodzących w procesie szlifowania. Źródłem EA w zakresie częstotliwości 50-80 kHz, niewidocznych podczas obciążania, są zjawiska mikrodeformacji zachodzące podczas szlifowania w obrabianym materiale. Natomiast źródłem EA o częstotliwościach w zakresie 100-250 kHz (wyraźnie

widocznych podczas obciążania) jest pękanie ziaren ściernicy i wiązań między nimi oraz tarcie, czyli zjawiska związane z procesem zużywania się ściernicy. Jednakże analiza DFT sygnału EA w różnych podzakresach częstotliwości nie daje zadowalających wyników z punktu widzenia znalezienia symptomów zużycia ściernicy. Wynika to prawdopodobnie z niestacjonarności i nieliniowości tego sygnału. Bardziej odpowiednią metodą analizy spektralnej takich sygnałów jest transformata falkowa.



Rys. 4.23. Zmiany widma sygnału EA w okresie trwałości ściernicy podczas szlifowania z $Q'_w = 2 \text{ mm}^3/\text{mms}$ i $q = 100$

Na rys. 4.24 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. Ponieważ wcześniej wykazano potencjalne możliwości wykorzystania kurtozy sygnału EA jako miary stanu mikrogeometrii CPS, to jako miarę zmian współczynników falkowych przyjęto również ich kurtozy spodziewając się, że w wybranym zakresie częstotliwości zmiany te będą bardziej wyraźne niż dla całego sygnału EA (rys. 4.22).



Rys. 4.24. Zmiana kurtozy składowych 010 sygnału EA w funkcji właściwego ubytku materiału obrabianego

Jak pokazuje rys. 4.24, względny przyrost wartości kurtozy dla sygnału EA w wybranym zakresie częstotliwości dla poszczególnych przypadków szlifowania jest większy niż dla całego sygnału. Podobnie jednak jak dla całego zakresu częstotliwości sygnału EA, przypadek szlifowania, dla którego wystąpiły przypalenia powierzchni przedmiotu stanowi wyjątek, co potwierdza podane wyżej wyjaśnienie i wniosek.

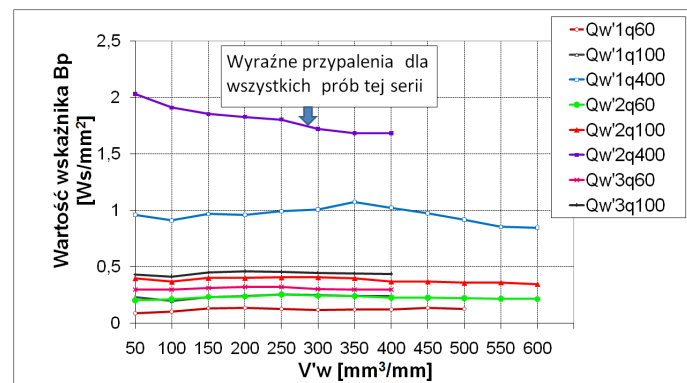
Zastosowanie surowego sygnału EA do nadzorowania mikrogeometrii CPS można podsumować w następujący sposób:

- Charakterystyka oryginalnego sygnału EA jest skorelowana z parametrami mikrogeometrii CPS.
- Zmiany zachodzące w rozkładzie ziaren na CPS mogą być ujawnione za pomocą współczynnika kurtozy sygnału EA.
- 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 sygnału EA nie jest dobrą miarą zużycia CPS w przypadku wystąpienia uszkodzeń cieplnych lub przypaleń powierzchni przedmiotu.

4.7. Nadzorowanie uszkodzeń cieplnych

Zagadnienia związane z powstawaniem uszkodzeń cieplnych i przypaleń podczas szlifowania zostały szeroko omówione w pracach B. Kruszyńskiego [Krus-01] i R. Wójcika [Wójc-06]. Wynika z nich, że nadzorowanie niekorzystnych zmian zachodzących w warstwie wierzchniej przedmiotu podczas szlifowania w wyniku oddziaływania zjawisk cieplnych może być efektywnie realizowane poprzez wyznaczanie wskaźnika B_p [rozdział 3.4]. 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 [Krus-01] następuje skokowy jej spadek dla pewnej wartości B_p . Można uznać, że dla tej wartości B_p temperatura osiąga poziom, powyżej którego rozpoczyna się powolny spadek mikrotwardości, aż do wystąpienia przypaleń. Wobec braku analitycznych modeli tych zjawisk i trudności z pomiarem rzeczywistej mikrotwardości warstwy wierzchniej, pozostaje doświadczalne wyznaczenie wartości B_p , dla której wystąpią łatwe do wizualnego stwierdzenia przypalenia. Odpowiednio obniżona wartość B_p może następnie służyć jako wartość graniczna wystąpienia niepożądanych zmian właściwości warstwy wierzchniej spowodowanych nadmiernym wzrostem jej temperatury w czasie szlifowania.

Na rys. 4.25 pokazano zmiany wartości wskaźnika B_p w okresie trwałości ściernicy dla wszystkich przeprowadzonych prób szlifowania.



Rys. 4.25. Zmiany wartości wskaźnika B_p w okresie trwałości ściernicy

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 $1,8 \text{ Ws/mm}^2$ i dla wszystkich cykli szlifowania w tej serii stwierdzono wystąpienie wyraźnych przypaleń na

powierzchni przedmiotu. Dla $q = 400$ i $Q'_w = 1 \text{ mm}^3/\text{mms}$ wskaźnik B_p oscyluje wokół wartości 1 Ws/mm^2 . W tej serii przypalenia nie wystąpiły, ale można przypuszczać, że podwyższona wartość B_p oznacza przekroczenie temperatury warstwy wierzchniej, powyżej której rozpoczynają się jej uszkodzenia cieplne. Wartości wskaźnika B_p dla wszystkich pozostałych parametrów szlifowania nie przekraczają $0,5 \text{ Ws/mm}^2$. Natomiast stan zdolności skrawnej ściernicy praktycznie nie ma znaczenia dla wartości wskaźnika B_p .

Analiza wartości wskaźnika B_p w przeprowadzonych badaniach doświadczalnych potwierdza jego przydatność do nadzorowania zjawisk cieplnych podczas szlifowania węgelnego stali. Możliwe jest stosunkowo szybkie doświadczalne wyznaczenie wartości B_p (np. poprzez zastosowanie odpowiednio małej prędkości obwodowej przedmiotu), dla której pojawiają się przypalenia powierzchni szlifowanej. Ta wartość odpowiednio obniżona (np. dwukrotnie) może następnie służyć jako wartość graniczna w nadzorowaniu uszkodzeń cieplnych. Ponieważ B_p praktycznie nie zależy od zużycia ściernicy, to jej wartość graniczna może być jednorazowo wyznaczona jako stała dla ustalonego zestawu wielkości wejściowych procesu.

4.8. Nadzorowanie chropowatości powierzchni szlifowanej

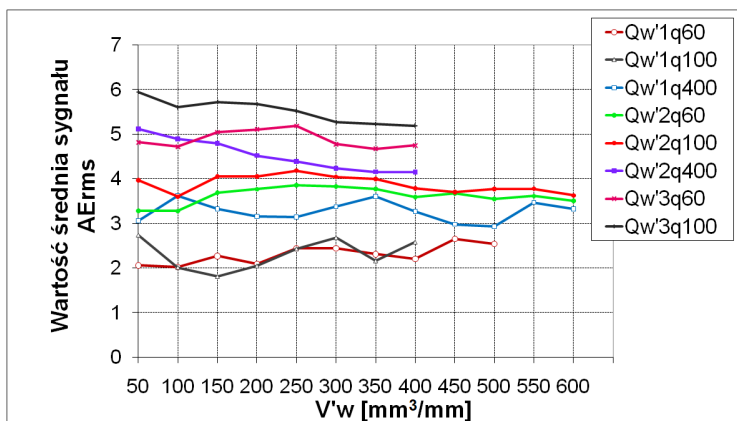
Na rys. 4.7 przedstawiono zmiany chropowatości powierzchni szlifowanej w okresie trwałości ściernicy. We wszystkich przypadkach, po całym okresie trwałości ściernicy następuje przyrost parametru R_a o kilka dziesiątych μm . Ponadto chropowatość rośnie wraz ze wzrostem wielkości dosuwu i spadkiem prędkości obwodowej przedmiotu. Poziom chropowatości dla prób, w których wystąpiły wyraźne przypalenia powierzchni przedmiotu jest znacznie wyższy.

Z przeglądu literatury (rozdział 2.3.4 i 3.5) wynika, że do estymacji chropowatości powierzchni przedmiotu szlifowanego najczęściej wykorzystywany jest sygnał emisji akustycznej. Na rys. 4.26, 4.27 i 4.28 pokazano wyniki zastosowania odpowiednio: wartości średniej arytmetycznej, rozstępu i współczynnika zmienności wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej (E_{ARMS}) do oceny zmian tego sygnału w okresie trwałości ściernicy i sprawdzenia potencjalnych możliwości ich wykorzystania do oceny chropowatości przedmiotu.

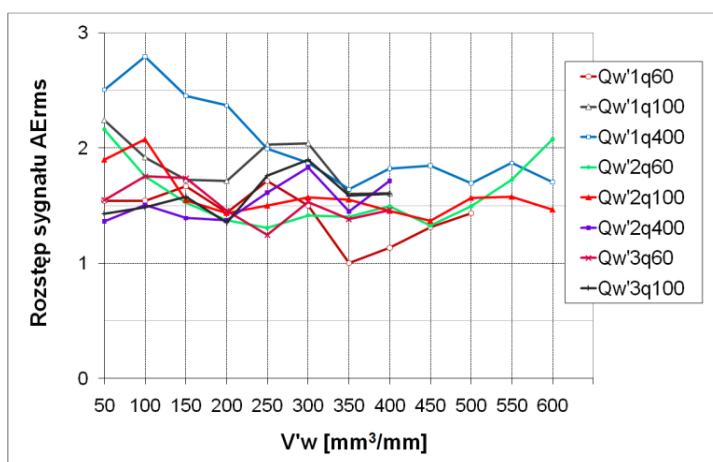
Zmiany średniej arytmetycznej wartości E_{ARMS} dla kolejnych cykli w okresie trwałości ściernicy (rys. 4.26) nie są wyraźne. Dla większych wartości Q'_w można zaobserwować około 10% spadek średniej wartości E_{ARMS} w okresie trwałości ściernicy. Poziom E_{ARMS} jest wyższy dla mniejszych prędkości obwodowych przedmiotu.

Rozstęp jest to różnica pomiędzy wartością maksymalną a minimalną sygnału i charakteryzuje jego obszar zmienności. Jak widać na rys. 4.27 zmiany rozstępu sygnału E_{ARMS} dla kolejnych cykli szlifowania w okresie trwałości

ściernicy mogą być dość duże, ale ich kierunek jest zmienny. Jedynie w jednym przypadku ($Q'_w = 1 \text{ mm}^3/\text{mms}$ i $q = 400$) następuje wyraźny spadek wartości rozstępu EArms w okresie trwałości ściernicy.

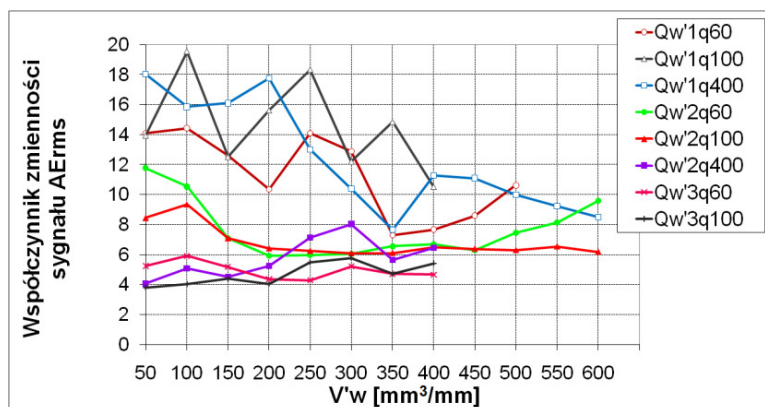


Rys. 4.26. Zmiany średniej arytmetycznej EArms w okresie trwałości ściernicy



Rys. 4.27. Zmiany rozstępu EArms w okresie trwałości ściernicy

Współczynnik zmienności jest ilorazem bezwzględnej miary zmienności sygnału jakim jest odchylenie standardowe i wartości średniej tego sygnału. W omawianym przypadku jest więc miarą zróżnicowania sygnału EA_{RMS} dla kolejnych cykli szlifowania. Na rys. 4.28 pokazano zmiany tego współczynnika dla sygnału EA_{RMS} w okresie trwałości ściernicy.



Rys. 4.28. Zmiany współczynnika zmienności EArms w okresie trwałości ściernicy

Zmiany współczynnika zmienności EArms w okresie trwałości ściernicy zależą od zastosowanych parametrów obróbki. Dla małej właściwej wydajności objętościowej szlifowania ($Q'_w = 1 \text{ mm}^3/\text{mms}$), zróżnicowanie sygnału jest wyższe i wartość współczynnika zmienności EArms wyraźnie spada w miarę zużywania się ściernicy. Dla większych Q'_w współczynnik ten zachowuje mniej więcej stałą wartość w okresie trwałości ściernicy, a w przypadku wystąpienia przypałów ($Q'_w = 2 \text{ mm}^3/\text{mms}$ i $q = 400$) jego wartość może nawet wzrosnąć.

Podobnie jak w przypadku składowych siły szlifowania, analiza wyników doświadczalnych przebiegu zmian miar statystycznych EArms w okresie trwałości ściernicy oraz brak korelacji tych zmian z chropowatością przedmiotu (rys. 4.7) wskazują na brak możliwości wiarygodnego nadzorowania chropowatości wyłącznie na podstawie tych miar. Nie potwierdza to wyników prezentowanych w literaturze [TöFB-02, Plic-02, SuPI-03]. Przyczyną może być fakt, że w pracach tych badania prowadzono dla szlifowania płaszczyzn. Cechy sygnału EArms w połączeniu z innymi miarami wielkości procesowych oraz wielkościami nastawnymi mogą być jednak przydatne jako składowe wektora wejściowego modelu chropowatości powierzchni przedmiotu zbudowanego na przykład w oparciu o sieci neuronowe [KaWI-00].

4.9. Podsumowanie doświadczalnej oceny miar stanu procesu

Pomiar parametrów liniowego przedstawienia krzywej udziału materiałowego zarysu profilu CPS wykazał, że do oceny stanu mikrogeometrii CPS należy posługiwać się raczej trendem zmian tych parametrów niż ich bezwzględnymi wartościami. Pozwoli to na estymację zmian zachodzących w mikrogeometrii w wyniku zużywania się CPS.

Falistość CPS będąca wynikiem rozwoju efektu regeneracyjnego drgań na ściernicy jest bardzo dobrym symptomem stanu makrogeometrii CPS. Natomiast zmiana amplitudy falistości na przedmiocie nie jest wiarygodnym symptomem zużycia CPS dla szlifowania wgłębnego kłowego. Fale na przedmiocie są ścinane przez ściernicę i dlatego resztkowa falistość na przedmiocie jest zawsze mniejsza niż amplituda drgań samowzbudnych.

Stan makrogeometrii CPS jest bardzo silnie skorelowany z rozwojem drgań samowzbudnych. Z tego powodu zmiany średniej wartości widma mocy drgań w zakresach częstotliwości obejmujących kolejne częstotliwości harmoniczne drgań własnych układu OUPN są dobrymi miarami stanu makrogeometrii CPS. Wykrywanie makrozuzycia CPS może odbywać się w oparciu o analizę sygnału drgań za pomocą FFT, jak i za pomocą transformaty falkowej. Przeprowadzona szczegółowa analiza miar stosowanych w obu transformatach wykazała jednak ich zróżnicowaną zależność od objętości usuniętego materiału i zastosowanych wielkości nastawnych. Dlatego byłoby najkorzystniej, aby proces podejmowania decyzji o stanie makrogeometrii CPS był procesem wielokryterialnym, uwzględniającym wszystkie omawiane miary.

Wyniki przeprowadzonych analiz pokazują, że również w przypadku podejmowania decyzji o stanie mikrogeometrii CPS i chropowatości powierzchni szlifowanej należy stosować procedury oceny wielokryterialnej uwzględniające wiele miar poddanych analizie doświadczalnej. Dotyczy to wszystkich miar wywodzących się z sygnałów pomiaru siły szlifowania i EA. Wynika to z braku wykazania wyraźnych korelacji tych miar ze stanem mikrogeometrii CPS i chropowatością powierzchni szlifowanej w przeprowadzonych badaniach doświadczalnych. Uzyskane zależności mają charakter niejednorodny, w związku z tym w procesie klasyfikacji potrzebne jest zastosowanie metody selekcji pozwalającej na znalezienie miar istotnych dla wyniku klasyfikacji.

Analiza wartości wskaźnika B_p w przeprowadzonych badaniach doświadczalnych potwierdziła jego przydatność do nadzorowania zjawisk cieplnych. Wartość graniczna B_p może być jednorazowo wyznaczona jako stała dla ustalonego zestawu wielkości wejściowych procesu, ponieważ praktycznie nie zależy ona od zużycia ściernicy.

5. AUTOMATYCZNE NADZOROWANIE PROCESU SZLIFOWANIA WGLĘBNEGO KŁOWEGO JAKO WIELOKRYTERIALNY PROBLEM DECYZYJNY

5.1. Strategia nadzorowania procesu szlifowania wglębnego kłowego

Celem każdego procesu obróbkowego, również procesu szlifowania, jest osiągnięcie wymaganych parametrów jakości przedmiotu obrabianego w możliwie najkrótszym czasie lub z poniesieniem możliwie najniższych kosztów. Wynika z tego, że jako kryteria oceny stanu procesu należy stosować:

- parametry jakości technologicznej przedmiotu,
- minimalny czas operacji lub maksymalną wydajność,
- minimalny koszt lub maksymalny zysk.

Dla procesu szlifowania kłowego wglębnego wałków, ze względu na jego charakterystykę, można przyjąć, że kryterium wydajności jest tożsame z kryterium kosztów [OcPo-86]. Istnieje zatem potrzeba określenia wielkości wejściowych procesu, które zapewnią realizację tak postawionego celu szlifowania. Ustalanie tych wielkości może odbywać się wg trzech strategii [Leża-03]:

1. Dobór początkowych wielkości wejściowych odbywa się za pomocą procedur optymalizacyjnych w systemie off-line i jest tak dobry, że nie wymaga korygowania dla kolejnych realizacji cyklu roboczego.
2. Wstępny dobór początkowych wielkości wejściowych odbywa się za pomocą procedur optymalizacyjnych w systemie off-line, a następnie wybrane wielkości nastawne procesu są korygowane on-line przez system sterowania adaptacyjnego.
3. Wstępny dobór początkowych wielkości wejściowych odbywa się za pomocą procedur optymalizacyjnych w systemie off-line, a następnie parametry te są korygowane po zakończeniu każdego cyklu na podstawie wyników automatycznego nadzorowania.

Wszystkie wymienione strategie mogą być stosowane jednocześnie, każda w stosunku do innej grupy wielkości wejściowych, w zależności od możliwości sprzętowych i programowych systemu szlifowania.

Wybór warunków szlifowania podlega ograniczeniom wynikającym z zalecanego obszaru szlifowania wyznaczonego we współrzędnych: właściwa wydajność objętościowa szlifowania – prędkość obwodowa przedmiotu (rozdział 3.2) i z konieczności spełnienia wymagań stawianych przez parametry jakości technologicznej przedmiotu. Należy wziąć pod uwagę ograniczenia wynikające z następujących czynników:

- przekroczenie tolerancji wymiaru i kształtu przedmiotu obrabianego,
- przekroczenie tolerancji chropowatości powierzchni obrabianej,

- wystąpienie uszkodzeń cieplnych powierzchni obrabianej,
- wysoki poziom drgań samowzbudnych,
- niska wydajność objętościowa szlifowania,
- wysoki poziom energii właściwej szlifowania,
- wzrost stałej czasowej przebiegów przejściowych,
- niewłaściwy przebieg zużycia ściernicy.

Strategia nadzorowania procesu polega więc na spełnieniu warunków ograniczających, wynikających ze wszystkich wymienionych wyżej czynników. Warunki te stanowią kryteria oceny stanu i wyników procesu. Ponadto muszą być uwzględnione, zwykle czysto techniczne, ograniczenia wynikające z dopuszczalnych zakresów zmienności warunków prowadzenia procesu. Jednak jak wykazano w rozdziale 3, z powodu ciągłych zmian zdolności skrawnej ściernicy i innych zakłóceń przebiegu procesu, położenie ograniczeń wynikających z zalecanego obszaru szlifowania zmienia się. Tym samym warunki szlifowania spełniające nałożone na proces ograniczenia również ulegają ciągłym zmianom. Te uwarunkowania powodują, że automatyczne nadzorowanie szlifowania powinno być oparte na ciągłym monitorowaniu zużycia ściernicy oraz zjawisk skorelowanych z ograniczeniami działającymi na proces celem utrzymywania procesu w stanie, w którym spełnione są wszystkie te ograniczenia. Tak więc problem automatycznego nadzorowania procesu szlifowania może być rozważany jako wielokryterialny problem decyzyjny [PiKR-09].

W technologii wytwarzania wynik oceny stanu może przyjmować wartości dyskretne, opisane zarówno liczbowo, jak i symbolicznie, z predefiniowanego zbioru, np. {1, 2, 3} lub {dobry, zły}. Powoduje to, że wielokryterialny problem decyzyjny w automatycznym nadzorowaniu procesu szlifowania sprowadza się do problemu klasyfikacji stanów i wyników procesu do zdefiniowanych klas. Możliwe wówczas jest, jak we wszystkich metodach wielokryterialnego wspomaganie decyzji, wkomponowanie w procedurę oceny wiedzy eksperta, poprzez stworzenie modelu jego preferencji dotyczących oceny poszczególnych stanów procesu. Ponadto, jeśli decyzje o przypisaniu stanu procesu do konkretnej klasy są podejmowane na podstawie reguł jawnie opisujących zależność poszczególnych stanów od wartości symptomów tego stanu, to możliwa jest diagnostyka przyczyn powstania tego stanu.

Wybór metody wielokryterialnego wspomaganie decyzji do zastosowania w automatycznym nadzorowaniu procesu szlifowania wymaga sformułowania wymagań jakie metoda ta powinna spełniać. Wymagania te dotyczą właściwości samej metody jak i charakterystyki przetwarzanych danych. Tak więc, metoda ta powinna:

- rozwiązywać decyzyjne problemy klasyfikacji,
- umożliwiać wprowadzenie wiedzy eksperckiej do systemu ocen,
- podawać wyniki w postaci łatwej do interpretacji, w tym umożliwiać diagnozowanie przyczyn zaistniałych stanów procesu,

- akceptować dane numeryczne i symboliczne, bez konieczności dyskretyzacji ilościowych danych liczbowych,
- radzić sobie z danymi niepełnymi, niespójnymi i sprzecznymi,
- nie wymagać dodatkowych założeń dotyczących danych (np. rozkładu prawdopodobieństwa czy rozmytości),
- charakteryzować się minimalnymi wymaganiami dotyczącymi znajomości przez użytkownika systemu mechanizmów działania metody,
- być technicznie stosunkowo łatwa do zaimplementowania w z natury zmiennym środowisku produkcyjnym.

Wymagania te spełnia metoda wielokryterialnego wspomaganie decyzji oparta na modelowaniu zależności pomiędzy poszczególnymi stanami procesu a wartościami symptomów tych stanów za pomocą reguł, które wyprowadzane są z danych o procesie za pomocą teorii zbiorów przybliżonych [Pawl-82] rozszerzonej o relację dominacji (ang. Dominance-based Rough Set Approach – DRSA) [GrMS-01, PiKR-09, Słow-00]. W metodzie tej, podobnie jak w przypadku sztucznych sieci neuronowych, wiedza indukowana jest z danych będących przykładami realizacji procesu i w danych tych mogą występować braki i niespójności. Jednakże w przeciwieństwie do sieci neuronowych ma ona postać reguł o postaci czytelnej dla użytkownika. W stosunku do systemów logiki rozmytej, zaletą DRSA jest brak konieczności dyskretyzacji dziedzin zmiennych systemu i wprowadzania dodatkowych założeń dotyczących danych np. odnośnie rozkładu ich rozmytości. Natomiast podobnie jak dla systemów rozmytych, analiza danych metodą zbiorów przybliżonych dostarcza efektywnych narzędzi do poszukiwania ukrytych cech analizowanych danych oraz algorytmów podejmowania decyzji. Wyniki analizy danych za pomocą DRSA mogą być wykorzystane do minimalizowania potrzebnego zbioru symptomów stanu procesu, a tym samym do redukcji zbędnych pomiarów lub cech sygnałów pomiarowych, do grupowania symptomów podobnych, do detekcji zależności niedeterministycznych, preselekcji obserwacji wykorzystywanych do budowy różnego typu modeli, a także do optymalizacji procesów decyzyjnych dotyczących diagnostyki nadzorowanego procesu. Można zatem powiedzieć, że DRSA, przynajmniej częściowo, eliminuje wady sztucznych sieci neuronowych i systemów rozmytych, zachowując przy tym ich zalety.

Jak wynika z rozdziału 2.4, w literaturze z zakresu nadzorowania procesów obróbki mechanicznej istnieje bardzo duża liczba prac, w których zastosowano sieci neuronowe i zbiory rozmyte do selekcji cech sygnałów i klasyfikacji stanu procesu. Jednocześnie brak jest prac na ten temat wykorzystujących metodę DRSA. Okoliczności te oraz wymienione cechy DRSA zdecydowały o wyborze tej metodologii do selekcji cech sygnałów pomiarowych i wielokryterialnej klasyfikacji stanu procesu w automatycznym nadzorowaniu procesu szlifowania wgłębnego kłowego.

W dalszej części rozdziału zostaną opisane podstawy teorii zbiorów przybliżonych oraz jej rozszerzenia o relację dominacji, sposób opracowania

danych dla klasyfikacji stanu procesu działającego w oparciu o tę teorię i wyniki zastosowania tej klasyfikacji do wielokryterialnej oceny stanu procesu szlifowania węgelnego kłowego. Opisane procedury są elementami składowymi systemu nadzorowania tego procesu opartego na metodzie wielokryterialnego wspomagania decyzji.

5.2. Teoria zbiorów przybliżonych rozszerzona o relację dominacji

Teoria zbiorów przybliżonych została zaproponowana przez Z. Pawłaka w roku 1982 [Pawl-82]. Sam Z. Pawlak zdefiniował ją krótko w następujący sposób: „Z logicznego punktu widzenia teoria zbiorów przybliżonych jest nowym podejściem do pojęć nieostrych, a z praktycznego punktu widzenia jest nową metodą analizy danych” [PaSł-07].

W klasycznej teorii zbiorów nie jest potrzebna żadna dodatkowa wiedza na temat elementów pewnego uniwersum, które tworzą dany zbiór. Nowe podejście w tej dziedzinie zaproponował L. Zadeh [Zade-65]. Przyjął on, że element może należeć do zbioru nie w pełni, lecz w pewnym stopniu, który określa funkcja przynależności tego elementu do danego zbioru. Stworzył w ten sposób podstawy teorii zbiorów rozmytych. Z. Pawlak zaproponował jeszcze inne rozumienie zbioru, którego nie można jednoznacznie zdefiniować, ponieważ niejednoznaczne są właściwości wszystkich jego elementów. Przyjął, że w każdym zbiorze mogą być elementy, które na podstawie posiadanej wiedzy można jednoznacznie zaklasyfikować do rozważanego zbioru oraz elementy, których przynależności do tego zbioru nie można wykluczyć. Zbiory takie nazwał zbiorami przybliżonymi (ang. rough sets).

5.2.1. Pojęcia podstawowe zbiorów przybliżonych

W teorii zbiorów przybliżonych podstawowe znaczenie mają pojęcia dolnego i górnego przybliżenia zbioru oraz obszaru brzegowego zbioru.

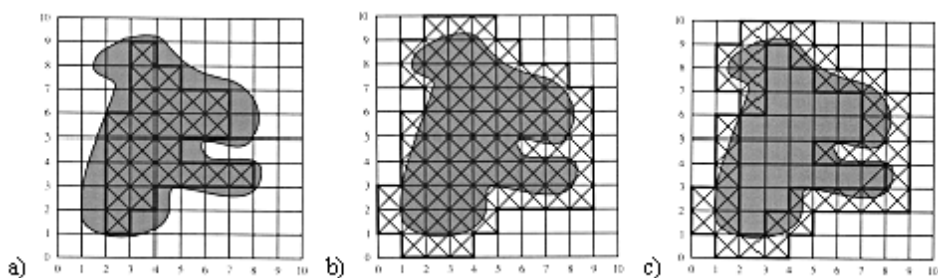
Dolne przybliżenie zbioru X tworzą elementy pewnego uniwersum U , o których można powiedzieć, że na pewno należą do zbioru X . Dolne przybliżenie tego zbioru oznacza się symbolem $\underline{X}$.

Górne przybliżenie zbioru X tworzą elementy pewnego uniwersum U , o których można powiedzieć, że być może należą do zbioru X – tj. w świetle posiadanej wiedzy nie można wykluczyć ich przynależności do zbioru X . Górne przybliżenie tego zbioru oznacza się symbolem $\overline{X}$.

Elementy, które należą do górnego, lecz nie należą do dolnego przybliżenia zbioru X , tworzą obszar brzegowy (brzeg) zbioru. Zgodnie z posiadaną informacją nie mogą być one opisane jako z pewnością należące do zbioru X .

Wynika to z tego, że informacja o tych elementach jest niespójna lub niejednoznaczna.

Zdefiniowane wyżej pojęcia zilustrowane są na rys. 5.1.



Rys. 5.1. Zbiór przybliżony w dwuwymiarowej przestrzeni rozważań. Pola z krzyżykiem oznaczają: a) dolne przybliżenie zbioru, b) górne przybliżenie zbioru, c) brzeg zbioru [Rutk-06]

Miarą jakości przybliżenia zbioru jest współczynnik dokładności przybliżenia określany jako stosunek liczności jego dolnego przybliżenia $\underline{X}$ do liczności jego górnego przybliżenia $\overline{X}$:

$$\text{Dokładność przybliżenia zbioru } X = \frac{\text{liczność dolnego przybliżenia } \underline{X}}{\text{liczność górnego przybliżenia } \overline{X}}$$

Jako miara nieostrości informacji w zbiorze X może być stosowana liczność brzegu tego zbioru [GrMS-01].

5.2.2. Tablice decyzyjne jako forma reprezentacji danych

Dogodną formą reprezentacji uzyskanych danych jest tablica informacyjna. Wiersze tej tablicy reprezentują przypadki, a kolumny wartości atrybutów (cech lub miar), za pomocą których przypadki te są opisywane. Przypadkami mogą być np. kolejne realizacje nadzorowanego procesu szlifowania opisywane za pomocą takich atrybutów jak siła szlifowania, amplituda drgań czy chropowatość powierzchni po szlifowaniu. Na przecięciu kolumn i wierszy znajdują się wartości poszczególnych atrybutów dla wszystkich reprezentowanych w tablicy przypadków.

Z formalnego punktu widzenia, tablicę informacyjną można określić jako czwórkę uporządkowaną $\langle U, A, V, f \rangle$, gdzie U jest niepustym i skończonym zbiorem przypadków zwanym uniwersum, A jest niepustym i skończonym zbiorem atrybutów, V jest zbiorem wszystkich możliwych wartości atrybutów, a $f: U \times A \rightarrow V$ jest funkcją informacyjną, taką że dla dowolnego przypadku należącego do zbioru U i dla dowolnego atrybutu należącego do zbioru A ,

wartość tej funkcji jest wartością tego atrybutu dla tego przypadku i należy do zbioru V [PaSł-07].

Jeżeli dla pewnego podzbioru atrybutów istnieje zbiór przypadków, dla których wartości tych atrybutów są takie same, to przypadki te są nierozróżnialne (pozostają w relacji nierozróżnialności) ze względu na ten podzbiór atrybutów [GrMS-01]. Relacja nierozróżnialności odgrywa ważną rolę w teorii zbiorów przybliżonych. Przypadki nierozróżnialne tworzą tzw. zbiory elementarne. Suma dowolnych zbiorów elementarnych tworzy zbiór nazywany definiowalnym. Zbiory definiowalne można jednoznacznie opisać za pomocą właściwości ich elementów, ponieważ są one rozróżnialne. Zatem zbiory przybliżone nie należą do zbiorów definiowalnych. Jednak każdy zbiór przybliżony (niedefiniowalny) można jednoznacznie opisać za pomocą dwóch zbiorów definiowalnych, jakimi są jego dolne i górne przybliżenie.

Definicja przybliżeń zbioru X , będącego podzbiorem zbioru przypadków (uniwersum) U , może być również zastosowana w klasyfikacji Y zbioru przypadków w U na pewną liczbę rozłącznych klas Y_n . Dolne przybliżenie tej klasyfikacji to zbiór dolnych przybliżeń tych klas $\underline{Y}$, natomiast górne przybliżenie klasyfikacji $\bar{Y}$ to zbiór górnych przybliżeń klas. Pozwala to na wprowadzenie miary jakości przybliżenia klasyfikacji danych (w skrócie: jakość klasyfikacji). Jest to stosunek sumy liczości dolnych przybliżeń klas $\underline{Y}$ do liczości zbioru wszystkich przypadków U [GrMS-01, Słow-00]:

$$\text{Jakość klasyfikacji} = \frac{\text{suma liczości dolnych przybliżeń klas } \underline{Y}}{\text{liczość zbioru wszystkich przypadków } U}$$

Jakość klasyfikacji jest więc cechą zbioru danych i wyraża ona odsetek obiektów prawidłowo sklasyfikowanych w systemie informacyjnym. Jeśli wartość jakości klasyfikacji jest równa 1, to znaczy, że w zbiorze danych nie ma danych sprzecznych lub niespójnych.

Tablica informacyjna staje się tablicą decyzyjną, jeśli zbiór jej atrybutów A można podzielić na rozłączne zbiory atrybutów warunkowych C i atrybutów decyzyjnych D (przy czym $A = C \cup D$). Z relacji nierozróżnialności wynika, że atrybuty decyzyjne, niezależnie od atrybutów warunkowych, dzielą zbiór przypadków U na zbiory D -elementarne, czyli zbiory przypadków nierozróżnialnych z punktu widzenia danego atrybutu decyzyjnego. Zbiory te tworzą klasy decyzyjne [GrMS-01, Słow-00].

Na rys. 5.2 pokazano przykładową tablicę decyzyjną dla hipotetycznego procesu wytwarzania. Proces ten posiada N atrybutów warunkowych oraz I atrybutów decyzyjnych dla M realizacji procesu. Zatem każdy wiersz tabeli reprezentuje pojedynczą realizację procesu opisaną za pomocą wektora wartości miar stanu procesu (np. posuwu, siły skrawania, amplitudy drgań, itp.) i odpowiadającego im wektora stanów (wyników) procesu (np. zdolności skrawnej narzędzia, chropowatości powierzchni obrabianej itp.). Wartości

składowych wektora miar stanu procesu pochodzą z układu monitorowania procesu, natomiast wartości wektora stanu procesu mogą być rezultatem wykonania odpowiednich pomiarów lub mogą być określone przez eksperta.

Nr przy- padku (nr realizacji procesu)	Atrybuty warunkowe (miary stanu procesu)				Atrybuty decyzyjne (stan procesu)		
	C_1 (np. posuw)	C_2 (np. siła skraw.)	...	C_N (np. ampl. drgań)	D_1 (np. zużycie narzędz.)	...	D_I (np. R_a)
1	...	...	...	...	...	...	...
2	...	...	...	...	...	...	...
3	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...
M	...	...	...	...	...	...	...

Rys. 5.2. Przykład tablicy decyzyjnej dla hipotetycznego procesu wytwarzania

Tablica decyzyjna może być rozważana jako zbiór reguł decyzyjnych o postaci „Jeżeli {zbiór warunków}, to {decyzja}”. Wiersze tablicy decyzyjnej są przykładami reguł decyzyjnych wynikającymi z danych.

Reguły decyzyjne mają ścisły związek z przybliżeniami. Przypadki opisane w poszczególnych wierszach tabeli decyzyjnej mogą należeć do dolnych przybliżeń, do górnych przybliżeń lub do brzegów klas decyzyjnych. Oznacza to, że z danych zawartych w tablicy decyzyjnej można generować reguły decyzyjne pewne (z dolnych przybliżeń), możliwe (z górnych przybliżeń) lub przybliżone (z brzegów klas decyzyjnych). Reguły pewne określane są jako deterministyczne, natomiast pozostałe jako niedeterministyczne [PaŚ-07].

5.2.3. Klasyfikowanie za pomocą reguł decyzyjnych

Procedury generowania reguł z przybliżeń klas decyzyjnych działają w oparciu o uczenie indukcyjne. Poszczególne przypadki są przykładami decyzji, z których indukowane są reguły będące uogólnionymi wzorcami służącymi do klasyfikacji zarówno bieżących, zawartych w tablicy decyzyjnej, jak i nowych przypadków. Klasyfikowanie nowych przypadków odbywa się na zasadzie dopasowania ich części warunkowej do części warunkowych wygenerowanych reguł [KrSt-04]. Tak więc zestaw wygenerowanych reguł decyzyjnych staje się modelem regułowym rozważanego obiektu.

Jakość reguł decyzyjnych, wygenerowanych z tabeli decyzyjnej można oceniać za pomocą kilku miar. Do najważniejszych z nich należą: wsparcie, siła, pokrycie i wiarygodność reguły.

Wsparcie reguły równe jest liczbie przypadków ją wspierających, natomiast stosunek wsparcia danej reguły do liczności wszystkich przypadków określa się mianem siły tej reguły:

$$\text{Siła reguły} = \frac{\text{liczba przypadków wspierających regułę}}{\text{liczba wszystkich przypadków w tablicy decyzyjnej}}$$

Współczynnik pokrycia reguły wyznacza się jako stosunek liczby przypadków spełniających zarówno warunki, jak i konkluzję reguły do liczby przypadków spełniających tylko jej konkluzję:

$$\text{Wsp. pokrycia} = \frac{\text{liczba przypadków spełniających warunki i konkluzję reguły}}{\text{liczba przypadków spełniających tylko konkluzję reguły}}$$

Wiarygodność reguły to stosunek liczby przypadków spełniających zarówno warunki, jak i konkluzję reguły do liczby przypadków spełniających tylko jej warunki:

$$\text{Wiarygodność} = \frac{\text{liczba przypadków spełniających warunki i konkluzję reguły}}{\text{liczba przypadków spełniających tylko przesłankę reguły}}$$

W ramach teorii zbiorów przybliżonych opracowano szereg procedur generowania, analizy i upraszczania reguł decyzyjnych w oparciu o tablice decyzyjne [Grzy-97, SSGM-01, Stefa-01]. Powstałe procedury indukcji reguł decyzyjnych mogą stosować następujące algorytmy [GrMS-01, Słow-00]:

- algorytm generowania minimalnego zbioru reguł pokrywających wszystkie przypadki z tablicy decyzyjnej,
- algorytm generowania zbioru reguł złożonego ze wszystkich możliwych reguł dla danej tablicy,
- algorytm generowania zbioru reguł o dużym współczynniku siły, ale nie w pełni dyskryminujących i niekoniecznie pokrywających wszystkie przypadki z tablicy decyzyjnej.

W wyniku zastosowania otrzymanych reguł decyzyjnych do klasyfikacji nowych przypadków możliwe jest wystąpienie jednej z następujących sytuacji [PiKR-09, PiKR-11]:

1. Przypadek jest dopasowany do dokładnie jednej reguły deterministycznej.
2. Przypadek pasuje do więcej niż jednej reguły deterministycznej, ale wszystkie przydzielają nowy przypadek do tej samej klasy decyzyjnej.
3. Przypadek pasuje do jednej reguły przybliżonej lub do kilku reguł sugerujących przydział nowego obiektu do różnych klas decyzyjnych.

4. Przypadek nie zostaje dopasowany do żadnej reguły decyzyjnej.

W dwóch pierwszych sytuacjach zaklasyfikowanie nowego przypadku będzie jednoznaczne, natomiast dwie ostatnie będą wymagały zastosowania dodatkowego postępowania. W sytuacji trzeciej może to być analiza siły poszczególnych reguł decyzyjnych, a w sytuacji czwartej można poszukiwać podobieństw między przypadkami [KrSt-04].

Wygenerowany zbiór reguł decyzyjnych musi zostać poddany weryfikacji poprzez ocenę trafności klasyfikowania. Miarą trafności klasyfikowania określa się stosunek liczby poprawnie sklasyfikowanych przypadków testowych do liczby wszystkich przypadków testowych:

$$\text{Trafność klasyfikacji} = \frac{\text{liczność poprawnie sklasyf. przypadków testowych}}{\text{liczność wszystkich przypadków testowych}}$$

Podobnie jak w innych metodach uczenia się z przykładów, w celu przeprowadzenia oceny trafności klasyfikowania zbiór przypadków zawarty w tablicy decyzyjnej dzieli się na zbiór uczący i zbiór testowy. Reguły decyzyjne generowane są wyłącznie z przypadków należących do zbioru uczącego, natomiast ocenę trafności klasyfikowania przeprowadza się wyłącznie na przypadkach ze zbioru testowego. Im większa trafność klasyfikowania, tym lepsze dopasowanie wyznaczonego regułowego modelu obiektu do obiektu rzeczywistego.

5.2.4. Redukcja atrybutów

Z punktu widzenia jakości klasyfikacji, część atrybutów warunkowych zawartych w tabeli decyzyjnej może być nadmiarowa. Nadmiarowe są te atrybuty, których usunięcie nie pogorszy informacji zawartej w oryginalnej tabeli. Teoria zbiorów przybliżonych pozwala wyznaczyć atrybuty nadmiarowe, niezbędne oraz wymienne. W tym celu wprowadzono pojęcie reduktu i rdzenia.

Reduktem zbioru atrybutów nazywamy najmniejszy jego podzbiór, który klasyfikuje przypadki dokładnie w taki sam sposób, w jaki zostałyby one sklasyfikowane przy wykorzystaniu wszystkich atrybutów. Redukt z definicji charakteryzuje się taką samą jakością klasyfikacji przypadków jak pełny zbiór atrybutów z tabeli informacyjnej. Nie oznacza to jednak, że trafność klasyfikacji będzie dla wszystkich reduktów również taka sama. Tablica informacyjna posiada zwykle więcej niż jeden redukt. Atrybuty, które nie znajdują się w żadnym redukcie są nadmiarowe.

Atrybuty, które występują we wszystkich reduktach tworzą rdzeń zbioru atrybutów. Atrybutów wchodzących w skład rdzenia nie można pominąć bez utraty jakości klasyfikacji. Pozostałe atrybuty występujące w reduktach to atrybuty wymienne [GrMS-01, PaSł-07, Słow-00].

5.2.5. Rozszerzenie teorii zbiorów przybliżonych o relację dominacji

Z punktu widzenia zastosowania teorii zbiorów przybliżonych do zadań klasyfikacji najważniejsze są jej możliwości w zakresie odkrywania wiedzy dziedzinowej z danych z uwzględnieniem semantyki tych danych. W tym kontekście istotny jest nie tylko podział na atrybuty warunkowe i decyzyjne oraz znalezienie najbardziej istotnych atrybutów warunkowych z punktu widzenia podejmowanych decyzji. Ważne jest również uwzględnienie porządku preferencyjnego w dziedzinie atrybutów i semantycznej korelacji istniejącej między atrybutami, czyli przestrzeganie zasady dominacji [PaSł-07].

Atrybuty ze skalą preferencji nazywane są kryteriami. Semantyczna korelacja między kryterium warunkowym i decyzyjnym oznacza, że polepszenie wartości kryterium warunkowego nie powinno spowodować pogorszenia wartości kryterium decyzyjnego, jeśli wartości pozostałych atrybutów warunkowych są niezmiennione. Korelacja taka wymaga, żeby przypadek x , którego wartości wszystkich kryteriów warunkowych są co najmniej tak dobre jak dla przypadku y , był oceniony co najmniej tak dobrze jak przypadek y , czyli żeby dominował y . Jest to obiektywna zasada wielokryterialnego porównywania obiektów, zwana zasadą dominacji [PaSł-07, Słow-00].

Klasyczna teoria zbiorów przybliżonych nie uwzględnia porządku preferencyjnego w dziedzinie atrybutów, a zatem nie wykryje sprzeczności w zbiorze danych, która wynika z pojęcia dominacji. Z tego względu relację nierozróżnialności (rozdział 5.2.2) zastąpiono relacją dominacji [GrMS-01, PaSł-07, Słow-00]. Powstałe w ten sposób podejście do zbiorów przybliżonych nazwano teorią zbiorów przybliżonych rozszerzoną o relację dominacji (ang. Dominance-Based Rough Set Approach – DRSA).

DRSA, podobnie jak teoria klasyczna, dokonuje klasyfikacji Y zbioru U na pewną liczbę rozłącznych klas decyzyjnych Y_n , ale klasy decyzyjne Y_n są klasami przypadków uporządkowanymi w ten sposób, że im wyższy numer klasy, tym lepsza klasa, czyli według preferencji. Powoduje to, że w DRSA idea pojedynczej klasy decyzyjnej zastępowana jest złożeniem klas decyzyjnych.

Złożenie klas w górę, co odpowiada określeniu „klasa co najmniej Y_t ”, definiowane jest w następujący sposób [PiKR-09]:

$$Y_t^{\geq} = \bigcup_{s \geq t} Y_s \text{ dla } t = 1, \dots, n$$

Natomiast złożenie klas w dół, co odpowiada określeniu „klasa co najwyżej Y_t ”, definiowane jest w następujący sposób:

$$Y_t^{\leq} = \bigcup_{s \leq t} Y_s \text{ dla } t = 1, \dots, n$$

Zbiór przypadków należących z pewnością do danego złożenia klas stanowi jego dolne przybliżenie, natomiast zbiór przypadków być może należących do tego złożenia klas stanowi jego górne przybliżenie.

Na dolne przybliżenie złożenia klas decyzyjnych w górę $Y_t^{\geq}$ składa się zbiór takich przypadków x , dla których wszystkie przypadki je dominujące należą do tego samego złożenia klas w górę $Y_t^{\geq}$. Górne przybliżenie złożenia klas decyzyjnych w górę $Y_t^{\geq}$ stanowi zbiór wszystkich przypadków y dominujących przypadki x z tego złożenia klas, tzn. obiekty y mogą należeć do danego złożenia klas w górę $Y_t^{\geq}$ lub do „gorszego” złożenia klas $Y_t^{\geq}$ dla $s < t$, czyli takiego, które klasyfikuje x niżej. Brzeg unii klas definiuje się jako różnicę jej górnego i dolnego przybliżenia [GrMS-01, PaSł-07, PiKR-09, Słow-00].

Analogicznie jak dla klasycznych zbiorów przybliżonych definiuje się dokładność i jakość przybliżenia złożenia klas oraz jakość klasyfikacji, z tym że liczność dolnego i górnego przybliżenia zbioru oraz odpowiednio klasy decyzyjnej zastępuje się licznosciami dolnego i górnego przybliżenia złożenia klas. Również definicje reduktu i rdzenia zbioru atrybutów (w przypadku DRSA -kryteriów) są takie same [PiKR-09].

Klasyczna teoria zbiorów przybliżonych oparta na relacji nierozróżnialności generuje reguły decyzyjne, które używają wyłącznie relacji „=”. Reguły generowane przez DRSA mają bogatszą składnię, ponieważ stosują relacje typu „ $\geq$ ”, „ $\leq$ ” i „=”. Z tego względu reprezentacja wiedzy w regułach wygenerowanych za pomocą DRSA jest bardziej syntetyczna. Ponadto, w przeciwieństwie do teorii klasycznej, DRSA nie wymaga dyskretyzacji atrybutów ilościowych [PaSł-07].

Z obu typów złoża klas decyzyjnych można wprowadzić decyzje pewne, możliwe lub przybliżone wg następujących zasad:

1. Decyzje pewne typu $D_{\geq}$ w odniesieniu do przypadków należących do dolnego złożenia klas decyzyjnych w górę,
2. Decyzje możliwe typu $D_{\geq}$ w odniesieniu do przypadków należących do górnego złożenia klas decyzyjnych w górę,
3. Decyzje pewne typu $D_{\leq}$ w odniesieniu do przypadków należących do dolnego złożenia klas decyzyjnych w dół,
4. Decyzje możliwe typu $D_{\leq}$ w odniesieniu do przypadków należących do górnego złożenia klas decyzyjnych w dół,
5. Decyzje przybliżone typu $D_{\geq\leq}$ w odniesieniu do przypadków należących do brzegów klas decyzyjnych.

Miary oceny tych reguł również definiuje się przez analogię do miar ustalonych dla klasycznej teorii zbiorów przybliżonych.

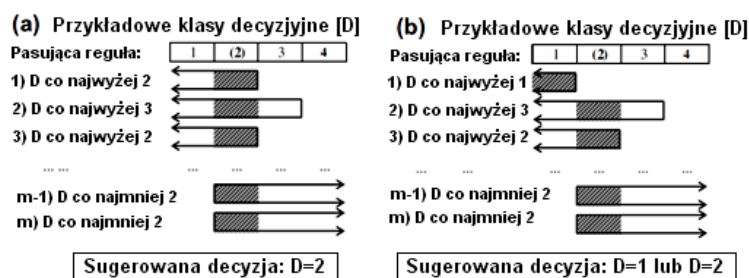
Praktyczne zastosowania DRSA wykazały, że często celowe jest „osłabienie” zasady dominacji poprzez wprowadzenie do dolnych przybliżeń złoża klas pewnej ograniczonej liczby przypadków niespójnych. Można to zrobić dzięki wprowadzeniu parametru l ($0 < l \leq 1$), nazwanego poziomem spójności. Wyrażenie $l * 100\%$ opisuje jaki procent przypadków należących do

dolnego przybliżenia złożenia klas należy bez wątpliwości do tego przybliżenia. Tak rozszerzona wersja DRSA została nazwana VC-DRSA (ang. Variable-Consistency DRSA). VC-DRSA daje pewną elastyczność w zaliczaniu przypadków do dolnych lub górnych przybliżeń klas i tym samym powoduje większą efektywność algorytmu generowania reguł decyzyjnych [PaŚl-07].

Metoda VC-DRSA wymagała opracowania nowego algorytmu klasyfikacji przypadków do klas decyzyjnych. Dla $l = 1$, ten nowy algorytm może być z korzyścią stosowany w DRSA [BłGS-07].

5.2.6. Klasyfikowanie nowych przypadków

W metodzie DRSA, celem sklasyfikowania nowego przypadku za pomocą reguł decyzyjnych wygenerowanych z uwzględnieniem zasady dominacji należy rozważyć wszystkie reguły, których części warunkowe pasują do opisu badanego przypadku. Przydział przypadku do klasy decyzyjnej odbywa się na podstawie ustalenia części wspólnej (przecięcia) wszystkich złożów klas wynikających z atrybutów decyzyjnych dopasowanych reguł [PiKR-09]. Przykład działania tej zasady ilustruje rys. 5.3.



Rys. 5.3. Przydział nowych przypadków do klas decyzyjnych w podejściu DRSA:
 a) przydział precyzyjny, b) przydział nieprecyzyjny [SaŻa-09] (tłumaczenie własne)

Jeśli przypadek nie zostanie dopasowany do żadnej z reguł decyzyjnych lub nie mogą być akceptowane przydziały nieprecyzyjne, wówczas stosowane są bardziej złożone procedury klasyfikacji wspomniane w rozdziale 5.2.3.

W metodzie VC-DRSA klasyfikacja nowych przypadków polega na wyznaczeniu miary dopasowania reguł do przypadków. Miarą tą jest wartość współczynnika obliczanego dla każdej klasy decyzyjnej na podstawie liczności zbioru przypadków o części warunkowej zgodnej z określoną regułą wspierającą te przypadki, liczności zbioru przypadków należących do danej klasy lub złożów klas w zbiorze uczącym i liczności części wspólnej obu tych zbiorów. Rozpatrywany przypadek jest następnie klasyfikowany do klasy, dla której ten współczynnik jest największy. W ten sposób brana jest pod uwagę zarówno siła reguł wspierających przydział do danej klasy, jak i siła pozostałych reguł, przemawiających przeciwko przydziałowi do tej klasy [BłGS-07].

5.3. Tablica decyzyjna dla procesu szlifowania wgłębnego kłowego

Wyniki badań doświadczalnych omówione w rozdziale 4 wykorzystano do ilustracji zastosowania teorii zbiorów przybliżonych rozszerzonej o relację dominacji w nadzorowaniu procesu szlifowania wgłębnego kłowego. Celem było uzyskanie potwierdzenia postawionej na początku tego rozdziału tezy, że DRSA jako metoda wielokryterialnego wspomagania decyzji może służyć do budowy regułowego modelu procesu będącego podstawą klasyfikacji stanu procesu szlifowania w systemie jego automatycznego nadzorowania.

Dane uzyskane w wyniku przeprowadzonych badań doświadczalnych zawierają 78 przypadków realizacji procesu zróżnicowanych ze względu na właściwą wydajność objętościową szlifowania Q'_w , stosunek prędkości obwodowej ściernicy do prędkości obwodowej przedmiotu q oraz stan zdolności skrawnej ściernicy reprezentowany przez właściwy ubytek materiału obrabianego od ostatniego obciążenia ściernicy V'_w .

Każdy przypadek szlifowania może być oceniony za pomocą 17 atrybutów warunkowych tworzących zbiór atrybutów warunkowych C .

Zestawienie atrybutów warunkowych podaje tabela 5.1.

Tabela 5.1. Atrybuty warunkowe i ich opis

Atrybut	Opis atrybutu warunkowego
C_1	właściwa wydajność objętościowa szlifowania Q'_w
C_2	stosunek prędkości q
C_3	właściwy ubytek materiału obrabianego V'_w
C_4	składowa normalna siły szlifowania F_n
C_5	składowa styczna siły szlifowania F_t
C_6	stosunek składowej stycznej do składowej normalnej siły szlifowania μ
C_7	wskaźnik gęstości strumienia ciepła działającego na przedmiot B_p
C_8	współczynnik zdolności skrawnej ściernicy K_z
C_9	współczynnik kurtozy sygnału EA
C_{10}	kurtoza składowych PWT sygnału EA w zakresie 125-187,5 kHz
C_{11}	średnia moc widmowa drgań w zakresie 600-1000 Hz
C_{12}	średnia moc widmowa drgań w zakresie 1200-2000 Hz
C_{13}	entropia składowych PWT sygnału drgań w zakresie 1875-2500 Hz
C_{14}	entropia składowych PWT sygnału EA _{RMS} w zakresie 625-1250 Hz
C_{15}	średnia wartość sygnału EA _{RMS}
C_{16}	rozstęp sygnału EA _{RMS}
C_{17}	współczynnik zmienności sygnału EA _{RMS}

Trzy pierwsze atrybuty warunkowe są wielkościami wejściowymi dla każdego przypadku szlifowania. Pozostałych 14 atrybutów to wielkości wyjściowe charakteryzujące przebieg i wyniki procesu. Umieszczenie wśród

atributów warunkowych wielkości wejściowych uwzględnia ich wpływ na wynik oceny procesu, zapobiegając przypisaniu tego wpływu innym przyczynom. Wszystkie atrybuty warunkowe, z wyjątkiem wielkości wejściowych Q'_w i q , mają charakter ilościowy, a zatem nie podlegały dyskretyzacji. Wielkości wejściowe Q'_w i q zostały zamodelowane jako dyskretne, ponieważ przyjmują zawsze jedną z trzech przewidzianych dla nich wartości.

Jako kryteria decyzyjne tworzące zbiór atrybutów decyzyjnych D przyjęto 5 wielkości należących do wyników procesu. Zestawiono je w tabeli 5.2.

Tabela 5.2. Atrybuty decyzyjne i ich opis

Atrybut	Opis atrybutu decyzyjnego
D_1	forma zużywania się ściernicy
D_2	stan makrogeometrii CPS
D_3	stan mikrogeometrii CPS
D_4	stan uszkodzeń cieplnych WW przedmiotu szlifowanego
D_5	klasa chropowatości powierzchni szlifowanej wg parametru R_a

Klasy decyzyjne dla poszczególnych atrybutów decyzyjnych zostały określone w sposób przedstawiony w tabeli 5.3.

Przydziału atrybutów decyzyjnych do klas dla każdego przypadku dokonano w oparciu o bezpośrednie miary stanu CPS i przedmiotu szlifowanego opisanych w rozdziałach 4.3 i 4.4.

Przydziału formy zużywania się ściernicy do klas decyzyjnych dokonano w oparciu o przebieg zmian wartości zredukowanej wysokości R_{Ges} będącej parametrem KUM profilu CPS (rys. 4.4 i 4.5). Przyjęto, że dopóki przyrost wysokości profilu CPS dla kolejnych 100 mm³/mm właściwego ubytku materiału nie przekroczy 10%, to występuje przewaga zużycia przez tępienie, natomiast jeśli ta wysokość wzrośnie o więcej niż 10%, to dla tego cyklu szlifowania i wszystkich następnych występuje przewaga samoostrzenia.

Tabela 5.3. Klasy decyzyjne i ich opis

Atrybut	Klasa	Opis klasy decyzyjnej
D_1	{T, S}	T = zużywanie się CPS z przewagą tępienia, S = zużywanie się CPS z przewagą samoostrzenia,
D_2	{1, 2}	1 = stan makrogeometrii CPS dobry, 2 = stan makrogeometrii CPS niedopuszczalny,
D_3	{1, 2}	1 = stan mikrogeometrii CPS dobry, 2 = stan mikrogeometrii CPS niezadowalający,
D_4	{1, 2, 3}	1 = brak uszkodzeń cieplnych WW, 2 = zagrożenie uszkodzeniami cieplnymi WW, 3 = wystąpienie przypaleń WW,
D_5	{1, 2, 3}	1 = R_a niski, 2 = R_a średni, 3 = R_a wysoki.

Przydziału stanu makrogeometrii CPS do klas decyzyjnych dokonano w oparciu o pomiar falistości CPS (rys. 4.6). Przyjęto, że jeżeli średnia wartość amplitudy wyrażona wartością mocy widmowej falistości CPS w zakresie 10–50 fal/obwód ściernicy jest mniejsza od $0,025 V_{RMS}$, to stan makrogeometrii CPS jest dobry. Natomiast jeżeli ta wartość jest równa lub większa od $0,025 V_{RMS}$, to stan makrogeometrii CPS jest niedopuszczalny.

Przydziału stanu mikrogeometrii CPS do klas decyzyjnych dokonano w oparciu o przebieg zmian wartości zredukowanej wysokości wzniesień R_{pk} KUM profilu CPS (rys. 4.4 i 4.5). Parametr ten w sposób syntetyczny dobrze opisuje stan mikrogeometrii CPS (rys. 3.5). Przyjęto, że jeżeli R_{pk} dla pierwszego cyklu po obciążaniu lub dla kolejnych $100 \text{ mm}^3/\text{mm}$ właściwego ubytku materiału obrabianego nie zmienia się lub przyrasta, to stan mikrogeometrii CPS jest dobry, natomiast jeśli zaczyna maleć, to stan ten jest niezadowolający.

Przydziału stanu uszkodzeń cieplnych WW przedmiotu szlifowanego do klas decyzyjnych dokonano na podstawie wyglądu powierzchni przedmiotu po szlifowaniu i wartości wskaźnika B_p . Jeżeli B_p był równy co najwyżej 0,8, to nie występowało zagrożenie uszkodzeniami cieplnymi. Jeżeli wskaźnik ten zawierał się pomiędzy 0,8 a 1,6, to oceniano, że występuje zagrożenie uszkodzenia cieplnego WW. W przypadku przekroczenia wartości 1,6 i stwierdzenia przypaleń na powierzchni przedmiotu, to oczywiście orzekano o wystąpieniu przypaleń WW.

Przydziału chropowatości powierzchni szlifowanej do klas decyzyjnych dokonywano na podstawie wartości parametru R_a uzyskiwanego w wyniku pomiaru wykonanego po zakończeniu danej próby szlifowania. Jeżeli wartość R_a była mniejsza od $0,83 \mu\text{m}$, to przydzielano do 1 klasy chropowatości, jeżeli wartość R_a zawierała się pomiędzy $0,84 \mu\text{m}$ a $1,24 \mu\text{m}$, to do 2 klasy chropowatości, natomiast jeżeli R_a była większa od $1,24 \mu\text{m}$, to do 3 klasy chropowatości.

Zasady przydziału atrybutów decyzyjnych do klas syntetycznie wyrażono w tabeli 5.4.

Tabela 5.4. Zasady przydziału atrybutów decyzyjnych do klas

Atrybut	Zasady przydziału do klasy
D_1	T dopóki przyrost R_{Ges} dla kolejnych $100 \text{ mm}^3/\text{mm} \leq 10\%$ S po przekroczeniu przyrostu R_{Ges} dla kolejnych $100 \text{ mm}^3/\text{mm}$ o $> 10\%$
D_2	1 jeśli śr. amplituda falistości CPS w zakresie 10-50 fal/obwód $< 0,025 V_{rms}$ 2 jeśli śr. amplituda falistości CPS w zakresie 10-50 fal/obwód $\geq 0,025 V_{rms}$
D_3	1 jeśli bieżący $R_{pk} \geq R_{pk}$ po obciążaniu lub dla kolejnych $100 \text{ mm}^3/\text{mm}$ 2 jeśli bieżący $R_{pk} < R_{pk}$ po obciążaniu lub dla kolejnych $100 \text{ mm}^3/\text{mm}$
D_4	1 jeśli $B_p \leq 0,8$; 2 jeśli $0,8 < B_p \leq 1,6$; 3 jeśli $B_p > 1,6$
D_5	1 jeśli $R_a \leq 0,83 \mu\text{m}$, 2 jeśli $0,83 < R_a \leq 1,25 \mu\text{m}$, 3 jeśli $R_a > 1,25 \mu\text{m}$

Aby między atrybutami warunkowymi ze zbioru C i decyzjami ze zbioru D istniała korelacja semantyczna, atrybuty warunkowe powinny mieć określone kierunki preferencji. Kierunek preferencji może być typu zysk lub koszt. Przyjęte oznaczenia klas decyzyjnych traktowane są jak etykiety tekstowe, w związku z tym z podanego wyżej opisu znaczenia tych etykiet wynika, że im wyższa klasa, tym stan lub wynik procesu jest gorszy. A zatem kierunek: 1, 2, 3 odpowiada kierunkowi typu koszt, co jest równoważne kierunkowi: 3, 2, 1 typu zysk. Wyjątek stanowi forma zużywania się ściernicy, która często ma charakter tylko informacyjny, chociaż w niektórych przypadkach jedna z tych form może być bardziej pożądana. Z powodów technicznych, kierunek preferencji dla wszystkich atrybutów decyzyjnych przyjęto zawsze jako typu zysk.

Dla atrybutów decyzyjnych znaczenie kierunku preferencji w interpretacji przydziałów nowych przypadków dokonanych przez reguły decyzyjne zależy od liczby klas decyzyjnych przydzielonych do danego atrybutu.

W przypadku trzech klas (3, 2, 1) typu zysk (atrybuty decyzyjne D_4 i D_5) interpretacja relacji „co najwyżej” i „co najmniej” w regułach decyzyjnych jest następująca:

1. co najwyżej klasa 3, jeśli wystąpił stan 3 lub gorszy, czyli stan 3,
2. co najwyżej klasa 2, jeśli wystąpił stan 2 lub gorszy, czyli stan 2 lub 3,
3. co najmniej klasa 1, jeśli wystąpił stan 1 lub lepszy, czyli stan 1,
4. co najmniej klasa 2, jeśli wystąpił stan 2 lub lepszy, czyli stan 2 lub 1.

W przypadku występowania tylko dwóch klas decyzyjnych (atrybuty decyzyjne D_1 , D_2 i D_3) przydział nowego przypadku następuje zawsze do jedno-klasowego złożenia klas, czyli wskazywana jest zawsze tylko jedna klasa, ponieważ:

1. co najwyżej klasa 2 (T dla D_1), jeśli wystąpił stan 2 (T dla D_1) lub gorszy, czyli stan 2 (T dla D_1),
2. co najmniej klasa 1 (S dla D_1), jeśli wystąpił stan 1 (S dla D_1) lub lepszy, czyli stan 1 (S dla D_1).

Określenie korelacji semantycznych między warunkami a decyzjami oraz związanych z nimi kierunków preferencji dla poszczególnych atrybutów warunkowych w przypadku oceny stanu i wyników procesów technologicznych nastęrcza pewne trudności. Do oceny tych procesów mogą być stosowane bardzo różne miary wyprowadzone z wielu sygnałów pomiarowych różnych wielkości fizycznych. Często charakter zależności pomiędzy wybraną miarą i ocenianą wielkością wyjściową zależy od innych warunków prowadzenia procesu i nie jest możliwe ustalenie stałego kierunku preferencji między nimi. W takich sytuacjach procedurę indukowania reguł decyzyjnych przez DRSA można przeprowadzić przyjmując dla danego warunku preferencję raz typu zysk, a następnie typu koszt. Taka procedura nazywana jest dublowaniem atrybutów [BİGS-11]. Otrzymany wynik indukcji reguł decyzyjnych pokaże, który kierunek preferencji jest prawidłowy.

Kierunki preferencji atrybutów warunkowych są odmienne dla poszczególnych atrybutów decyzyjnych. W tabeli 5.5 pokazano zestawienie przyjętych kierunków preferencji. Kiedy jednoznaczne określenie kierunku preferencji było niemożliwe bądź niepewne, wtedy w tabeli występuje określenie „BRAK”, co oznacza, że w procedurze indukcji reguł decyzyjnych stosowano dublowanie atrybutów warunkowych.

Tabela 5.5. Kierunki preferencji atrybutów warunkowych

ATRYBUTY DECYZYJNE	ATRYBUTY WARUNKOWE																
	Warunki obróbki (Parametry szlifowania)			Miary mikrogeometrii CPS							Miary makrogeometrii CPS				Miary chropowatości powierzchni przedmiotu		
				Miary pochodne od siły szlifowania					Emisja Akustyczna		FFT drgań		PWT drgań	PWT EA _{RMS}			
				F _n	F ₁	μ	B _p	K _z	Kurtoza EA	Kurtoza PWT EA 125- 187,5 kHz	Sr. moc widma 600-1000 Hz	Sr. moc widma 1200- 2000 Hz	Entropia składowych 1875- 2500 Hz	Entropia składowych 625- 1250 Hz			
	Q _w	q	V _w	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	EA _{RMS} średnia	EA _{RMS} rozstęp	EA _{RMS} współcz. zmienności
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆	C ₁₇
Rodzaj zużycia ściernicy	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK
Stan makrogeometrii CPS	BRAK	BRAK	BRAK	KOSZT	KOSZT	BRAK	BRAK	BRAK	KOSZT	KOSZT	KOSZT	KOSZT	KOSZT	KOSZT	BRAK	BRAK	BRAK
Stan mikrogeometrii CPS	BRAK	BRAK	BRAK	KOSZT	KOSZT	KOSZT	BRAK	ZYSK	KOSZT	KOSZT	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK
Uszkodzenia cieplne WW przedmiotu	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	KOSZT	KOSZT	KOSZT	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK
Klasa chropowatości wg Ra	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	BRAK	KOSZT	BRAK	KOSZT	KOSZT	KOSZT	KOSZT	KOSZT	KOSZT	ZYSK	ZYSK	ZYSK

Jak podano w opisie warunków przeprowadzenia badań doświadczalnych, pomiary oryginalnego sygnału EA, falistości i parametrów KUM CPS oraz chropowatości powierzchni przedmiotu po szlifowaniu wykonywano dla co drugiego cyklu szlifowania. W związku z tym oryginalne dane dla atrybutów C₉ i C₁₀ oraz D₁, D₂, D₃ i D₅ występowały tylko dla co drugiego przypadku. Chociaż DRSA akceptuje braki w danych, to jednak lepsze wyniki można uzyskać interpolując brakujące dane. Z tego względu uzupełniono brakujące dane dla wymienionych atrybutów wartościami średnimi z przypadku poprzedniego i następnego. Stosując przedstawione zasady, skonstruowano tablicę decyzyjną do klasyfikacji stanu i wyników procesu szlifowania wgłębnego w oparciu o dane doświadczalne opisane w rozdziale 4. Przedstawiono ją w tabeli 5.6.

Tabela 5.6. Tablica decyzyjna, część I

NR	ATRYBUTY WARUNKOWE																				ATRYBUTY DECYZYJNE				
	Warunki obróbki (Parametry szlifowania)			Miany makrogeometrii CPS										Miany mikrogeometrii CPS							Rodzaj zuzycia ściemcy	Stan makro- geometrii i CPS	Stan miko- geometrii i CPS	Uszkodz enia ciepne WW atości przecmio tu	Klasa chropow atości wg R _a
				Miany pochodne od siły szlifowania					Emisja Akustyczna					Miany makrogeometrii CPS											
									FFT drgań					PWT drgań		Entropia składowych		PWT drgań		Entropia składowych					
Q _v	q	V _w	F _n	F _t	μ	B _g	K _c	K _{utoza} EA	K _{utoza} PWT/EA 125-187,5 kHz	S _r moc widma 600- 1200- 2000 Hz	S _r moc widma 1200- 2000 Hz	FFT drgań	PWT drgań	PWT E _{RAIS}	E _{RAIS} współcz. zmien- ności	E _{RAIS} średnia	E _{RAIS} rozstęp	E _{RAIS} zmien- ności	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅		
C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅		
1	60	50	118,2650	39,1090	0,330690	0,089794	0,219645	-0,07618	-0,07618	1,22E-05	7,89E-05	-9196,85	-22651,8	2,056753	1,542659	14,08990	T	1	1	1	1	1	1	1	
2	60	100	124,3690	44,9225	0,361203	0,103142	0,200055	-0,01618	-0,01618	1,28E-05	1,06E-05	-8756,95	-22664,2	2,006571	1,542659	14,43245	T	1	1	1	1	1	1	1	
3	60	150	146,4960	58,1350	0,396837	0,133478	0,177179	-0,02848	-0,02848	1,72E-05	1,12E-05	-8131,47	-22555,5	2,207571	1,695922	12,60272	T	1	1	1	1	1	1	1	
4	60	200	147,2590	59,5091	0,404112	0,136533	0,176560	-0,030979	-0,030979	1,94E-05	1,15E-05	-7876,19	-22546,4	2,093611	1,404300	10,33904	T	1	1	1	1	1	1	1	
5	60	250	147,2590	55,4925	0,376836	0,124111	0,176560	-0,069924	-0,069924	2,16E-05	1,12E-05	-7876,19	-21722,8	2,47409	1,713667	14,03972	T	1	1	1	1	1	1	1	
6	60	300	137,3400	51,7930	0,371115	0,118917	0,189311	0,028623	0,028623	-0,05571	1,62E-05	-6138,09	-21487,6	2,47054	1,49023	12,88279	T	1	1	1	1	1	1	1	
7	60	350	138,6660	52,8500	0,380583	0,123444	0,181231	0,05948	0,05948	0,07398	1,67E-05	-5995,05	-21269,8	2,39978	1,00977	7,29411	T	1	1	1	1	1	1	1	
8	60	400	139,6590	53,3785	0,382288	0,122557	0,186208	0,090573	0,090573	0,09368	1,64E-05	-5950,97	-21052,1	2,19954	1,13213	7,67326	T	1	1	1	1	1	1	1	
9	60	450	135,0210	59,1920	0,438284	0,135905	0,192520	0,13219	0,13219	0,326818	1,79E-05	-5000,31	-3382,49	-20628,9	2,653300	1,31477	8,59758	T	2	1	1	1	1		
10	60	500	132,7620	55,4925	0,417985	0,127411	0,195839	0,175065	0,175065	0,561330	1,42E-05	-942E-05	-4081,67	-20726,3	2,57086	1,43547	10,61659	T	2	1	1	1	1		
11	100	50	134,2880	60,2490	0,448655	0,231718	0,193614	0,166540	0,166540	0,029127	1,19E-05	-8511,01	-22724,3	2,011750	1,918545	19,54244	T	1	1	1	1	1	1	1	
12	100	100	124,3690	51,2645	0,412197	0,197163	0,200055	-0,036540	-0,036540	0,029127	1,19E-05	-8511,01	-22724,3	2,011750	1,918545	19,54244	T	1	1	1	1	1	1	1	
13	100	150	123,6060	60,2490	0,487428	0,231718	0,210346	-0,013662	-0,013662	-0,046621	1,93E-05	-7888,09	-22468,9	2,044700	1,713667	15,61321	T	1	2	1	1	1	1	1	
14	100	200	128,1840	62,3630	0,486512	0,238848	0,202833	0,09216	0,09216	-0,046621	1,93E-05	-7888,09	-22468,9	2,044700	1,713667	15,61321	T	1	2	1	1	1	1	1	
15	100	250	131,9990	66,5910	0,504481	0,256109	0,196871	-0,000650	-0,000650	-0,046621	1,93E-05	-7888,09	-22468,9	2,044700	1,713667	15,61321	T	1	2	1	1	1	1	1	
16	100	300	133,5250	65,5340	0,490799	0,255044	0,194720	-0,070917	-0,070917	0,037321	3,77E-05	-443E-05	-6825,85	-21733	2,47754	2,031250	18,32589	T	1	2	1	1	1	1	
17	100	350	125,1320	62,8915	0,502601	0,241881	0,207781	-0,004685	-0,004685	0,168238	6,42E-05	-806E-05	-4326,46	-21697,2	2,157208	1,601663	14,83701	T	2	2	1	1	1	1	
18	100	400	126,6580	62,8915	0,496546	0,241881	0,205277	0,060946	0,060946	0,289556	5,9E-05	-755E-05	-4055,05	-20670,2	2,514551	1,636445	10,52426	T	2	2	1	1	1	1	
19	100	450	112,1610	62,3630	0,556013	0,255044	0,231810	-0,027135	-0,027135	0,112560	1,17E-05	-1,02E-05	-6905,16	-21397,9	3,05352	2,534883	18,03689	T	1	2	2	1	1	1	
20	100	500	110,6350	59,1920	0,535021	0,210669	0,233607	-0,027135	-0,027135	0,084596	1,32E-05	-1,02E-05	-6905,16	-21397,9	3,05352	2,534883	18,03689	T	1	2	2	1	1	1	
21	100	150	111,3880	62,8915	0,564568	0,265686	0,233397	0,092141	0,092141	0,084596	1,32E-05	-1,02E-05	-6905,16	-21397,9	3,05352	2,534883	18,03689	T	1	2	2	1	1	1	
22	100	200	111,3880	62,3630	0,559822	0,265686	0,233397	0,092141	0,092141	0,065631	1,88E-05	-1,52E-05	-5983,32	-20731,7	3,159018	2,381654	17,5097	T	1	1	2	1	1	1	
23	100	250	115,9760	64,4770	0,555951	0,265686	0,233397	0,092141	0,092141	0,062432	2,91E-05	-5203,6	-20129,8	3,373996	1,80117	10,37953	T	1	1	1	2	1	1		
24	100	300	115,2130	65,5340	0,568807	1,006241	0,225689	0,086546	0,086546	0,062432	2,91E-05	-5203,6	-20129,8	3,373996	1,80117	10,37953	T	1	1	1	2	1	1		
25	100	350	120,5540	69,7620	0,578878	1,073288	0,215671	0,086546	0,086546	0,16553	5,89E-05	-5305,05	-3730,62	-1961,4	3,695165	1,640625	7,66350	S	1	1	1	2	1	1	
26	100	400	119,0280	66,5910	0,559457	1,024503	0,218436	0,051173	0,051173	0,164871	5,2E-05	-571E-05	-922,015	-19520,5	3,271495	1,821289	11,28251	S	1	1	1	2	1	1	
27	100	450	123,6060	63,4200	0,513082	0,975717	0,210346	0,102538	0,102538	0,086031	9,87E-05	-5000,62	-1197,07	-18991,8	2,980223	1,845703	11,09137	S	2	1	1	2	1	1	
28	100	500	122,8430	59,7205	0,486153	0,916800	0,211652	0,153903	0,153903	0,07191	6,39E-05	-5000,62	-1287,12	-19019,7	2,930999	1,694336	9,98419	S	2	1	1	2	1	1	
29	100	550	117,5020	55,4925	0,472269	0,853752	0,221273	0,089578	0,089578	0,121956	8,85E-05	-5000,62	-891,955	-18588	3,470377	1,80117	9,22151	S	2	1	1	2	1	1	
30	100	600	125,1320	54,9640	0,439248	0,845621	0,207781	0,025254	0,025254	0,236727	6,94E-05	-5000,62	-198,464	-20907,5	3,275977	2,153066	11,77159	S	2	1	1	2	1	1	
31	2	60	50	198,3800	88,2595	0,444901	0,202644	0,262123	-0,013855	-0,046880	1,93E-05	-2,43E-05	-6106,16	-20907,5	3,275977	2,153066	11,77159	S	1	1	1	1	1	1	
32	2	60	100	193,0390	91,9590	0,476375	0,211138	0,269376	-0,013855	-0,046880	1,93E-05	-2,43E-05	-6106,16	-20907,5	3,275977	2,153066	11,77159	S	1	1	1	1	1	1	
33	2	60	150	209,8250	101,4720	0,483603	0,232960	0,247626	-0,002570	0,026965	2,11E-05	-3,55E-05	-5905,58	-20833,8	3,695054	1,528320	7,09221	S	1	1	1	1	1	1	
34	2	60	200	217,4550	110,5860	0,476356	0,237833	0,229130	0,08715	0,19270	2,57E-05	-4,45E-05	-4983,32	-20760	3,766615	1,370270	5,92880	S	1	1	1	1	1	1	
35	2	60	250	233,4780	114,4565	0,473092	0,255608	0,227119	0,065883	0,197800	3,3E-05	-3,81E-05	-5371,91	-20596,6	3,859867	1,398594	5,95557	S	1	1	1	1	1	1	
36	2	60	300	231,9520	106,2285	0,457976	0,243901	0,224184	0,04450	0,203331	0,000154	-5403,05	-5403,05	-20072,2	3,803300	1,416016	6,04100	S	2	1	1	1	1	1	
37	2	60	350	225,1320	105,1715	0,453419	0,241474	0,063377	0,063377	0,090426	0,000154	-5403,05	-5403,05	-20072,2	3,803300	1,416016	6,04100	S	2	1	1	1	1	1	
38	2	60	400	224,3220	99,3580	0,442926	0,226126	0,233910	0,02203	0,072923	0,000395	-2212,02	-18594,4	3,769312	1,431367	5,64967	S	2	1	1	1	1	1	1	
39	2	60	450	222,7960	98,3010	0,441215	0,225689	0,236739	0,042906	0,072923	0,000221	-1875,62	-18752,6	3,73517	1,328125	6,27488	S	2	1	1	1	1	1	1	
40	2	60	500	219,7440	97,8400	0,442533	0,223272	0,236839	0,063508	0,072923	0,000448	-1287,15	-18100,8	3,54165	4,44541	7,44650	S	2	1	1	1	1	1	1	
41	2	60	550	213,6400	94,6015	0,442808	0,217205	0,243400	0,085229	0,210837	0,000465	-1091,96	-18100,8	3,61139	4,44541	7,44650	S	2	1	1	1	1	1	1	
42	2	60	600	206,0100	93,5445	0,454077	0,214778	0,252415	0,126951	0,253356	0,000237	-5403,05	-5403,05	-20072,2	3,803300	1,416016	6,04100	S	2	1	1	1	1	1	

Tabela 5.6. Tablica decyzyjna, część II

NR	A TRYBUTY WARUNKOWE																	A TRYBUTY DECYZYJNE				
	Warunki obróbki (Parametry szlifowania)			Miarę mikrogeometrii CPS								Miarę chropowatości powierzchni przedmiotu						Rodzaj zużycia ściernicy i CPS	Stan makrogeometrii i CPS	Stan mikrogeometrii i CPS	Uszkodzenia cieplne WW przedmiotu	Klasa chropowatości wg R _a
				Miarę pochodne od siły szlifowania					Emisja Akustyczna			Miarę makrogeometrii CPS										
				F _n	F _t	μ	B _p	K _z	Kurtoza EA	Kurtoza PWT EA 125-187,5 kHz	Śr. moc widna 1000 Hz	Śr. moc widna 600-1200 Hz	FFT drgań	Entropia składowych 1875-2500 Hz	PWT drgań	PWT EA _{us}	Entropia składowych 625-1250 Hz					
C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆	C ₁₇	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	
43	2	100	50	190,7500	103,5660	0,543046	0,398392	0,272608	0,063411	-0,067817	1,21E-05	2,41E-05	-6,52397	-20395,7	3,954824	1,899414	8,444775	S	1	2	1	1
44	2	100	100	183,1200	95,6595	0,522391	0,367503	0,283967	0,063411	-0,067817	1,37E-05	2,15E-05	-7,44129	-20841,2	3,598613	2,075195	9,353166	S	1	2	1	1
45	2	100	150	200,6690	104,6430	0,521471	0,402457	0,259133	0,052014	-0,092143	1,81E-05	2,62E-05	-6,58877	-20328,9	4,050509	1,547852	7,079347	S	1	1	1	1
46	2	100	200	206,0100	104,6430	0,507651	0,402457	0,252415	0,040617	-0,116470	1,9E-05	2,71E-05	-6,89195	-20483,9	4,055011	1,435447	6,401790	S	1	1	1	1
47	2	100	250	215,9290	105,7000	0,489513	0,406522	0,240620	0,007625	0,066710	3,29E-05	3,83E-05	-6,35044	-20228,4	4,183790	1,499023	6,233309	S	1	1	1	2
48	2	100	300	216,9820	106,2285	0,490228	0,408555	0,239972	-0,025368	0,129390	7,55E-05	4,41E-05	-5,29403	-20220,6	4,042662	1,572266	6,075038	S	1	1	1	2
49	2	100	350	226,6110	104,1145	0,459442	0,400424	0,229468	0,012017	0,071988	0,000137	0,000131	-3,98415	-19793,6	3,998550	1,552734	5,095182	S	1	1	1	2
50	2	100	400	222,0330	96,1870	0,433210	0,389935	0,234199	0,049402	0,128505	0,000212	0,000279	-842,868	-18850,8	3,783273	1,455078	6,480594	S	1	1	1	2
51	2	100	450	221,2700	96,1870	0,434704	0,389935	0,235007	0,079012	0,172516	0,000237	0,000438	-474,548	-18466,3	3,689726	1,367188	5,384109	S	2	1	1	2
52	2	100	500	216,6920	93,0160	0,429254	0,357740	0,239972	0,198821	0,316527	0,000222	0,000278	-744,656	-18470	3,773700	1,567383	6,298230	S	2	1	1	2
53	2	100	550	220,5070	94,0730	0,426621	0,361605	0,235620	0,198521	0,515814	0,00019	0,000413	-1045,13	-18036,8	3,776236	1,57748	6,539431	S	2	1	1	2
54	2	100	600	218,9810	90,3735	0,412700	0,347576	0,237464	0,229420	0,715101	0,000149	0,000764	-551,2728	-16421,6	3,624957	1,484844	6,194550	S	2	1	1	2
55	2	400	50	301,3850	132,1250	0,438393	2,032743	0,172537	0,022048	0,218235	4,1E-05	5,19E-05	-5195,11	-19512,8	5,119923	1,362205	4,052725	S	1	1	3	3
56	2	400	100	267,0500	124,1975	0,465072	1,910779	0,194720	0,022048	0,218235	4,1E-05	3,92E-05	-6220,04	-19804,5	4,889363	1,503906	5,084544	S	1	1	3	3
57	2	400	150	283,9680	120,4980	0,456435	1,853662	0,196871	0,055452	0,112495	5,06E-05	4,34E-05	-6004,61	-20033,9	4,795813	1,391602	4,525130	S	1	2	3	3
58	2	400	200	259,4200	118,9125	0,458378	1,829469	0,200447	0,088856	0,066755	7,82E-05	9,91E-05	-4805,54	-19865,4	4,520451	1,372070	5,236224	S	1	2	3	3
59	2	400	250	265,5240	117,3270	0,441870	1,805078	0,195639	0,051468	0,051816	0,000112	0,000171	-3709,35	-19486,9	4,389091	1,611328	7,142343	S	1	2	3	3
60	2	400	300	259,4200	112,0420	0,431694	1,723766	0,200447	0,014079	0,096477	0,000199	0,000318	-1982,42	-19375,7	4,235812	1,831055	8,032514	S	2	1	3	3
61	2	400	350	256,3680	109,3695	0,426728	1,683111	0,202853	0,031865	-0,002835	0,000231	0,00039	-1378,53	-19488,8	4,154499	1,450195	5,628490	S	2	1	3	3
62	2	400	400	253,3160	109,3695	0,431870	1,683111	0,205277	0,049651	-0,102446	0,000213	0,000368	-1494,1	-19241,1	4,151761	1,713867	5,450929	S	2	1	3	3
63	3	60	50	271,6280	130,0110	0,478636	0,298505	0,300871	-0,089986	0,101370	3,66E-05	2,93E-05	-6085,8	-19796,9	4,819191	1,547852	5,295166	S	1	1	1	3
64	3	60	100	259,4200	130,0110	0,501160	0,298505	0,300871	-0,089986	0,101370	3,66E-05	2,93E-05	-6085,8	-19796,9	4,819191	1,547852	5,295166	S	1	1	1	3
65	3	60	150	282,3100	135,2960	0,479246	0,310640	0,275292	-0,004788	0,080750	4,16E-05	3,28E-05	-6140,32	-19414,3	5,04069	1,739281	5,168573	S	1	1	1	3
66	3	60	200	297,5700	140,5810	0,472430	0,322774	0,262123	0,071409	0,060130	5,43E-05	3,74E-05	-5895,43	-19555,1	5,109664	1,455078	4,360388	S	1	1	1	3
67	3	60	250	315,1190	139,5240	0,442768	0,320347	0,247526	0,099188	0,158657	8,88E-05	4,71E-05	-5205,25	-19390,5	5,185468	1,245177	4,295681	S	2	1	1	3
68	3	60	300	313,5930	132,1250	0,421326	0,303359	0,248730	0,126968	0,257604	0,000287	0,000231	-2514,06	-18880,9	4,776314	1,53203	5,209525	S	2	1	1	3
69	3	60	350	310,5410	130,0110	0,419650	0,298505	0,251175	0,090521	0,246730	0,000287	0,000301	-1524,27	-18513,6	4,673760	1,381836	4,703182	S	2	1	1	3
70	3	60	400	311,3040	129,4825	0,415636	0,297292	0,250559	0,054074	0,235856	0,000307	0,000313	-1331,96	-18182,9	4,747901	1,459961	4,652754	S	2	1	1	3
71	3	100	50	273,1540	112,0420	0,410179	0,430814	0,285553	0,099400	0,219827	5,02E-05	5,41E-05	-5411,86	-18875,3	5,939961	1,430664	3,803413	S	1	1	1	1
72	3	100	100	260,1830	107,8140	0,414378	0,414653	0,299789	0,099400	0,219827	5,02E-05	5,41E-05	-5411,86	-18875,3	5,939961	1,430664	3,803413	S	1	1	1	1
73	3	100	150	289,9400	116,7695	0,402637	0,449207	0,269021	0,038253	0,062469	5,03E-05	3,91E-05	-5846,36	-1907,3	5,724682	1,57748	4,394681	S	1	2	1	1
74	3	100	200	301,3850	119,9695	0,398061	0,461403	0,258805	0,037107	-0,094888	0,000172	6,3E-05	-5457,1	-18970,7	5,671100	1,362539	4,03506	S	2	2	1	1
75	3	100	250	318,1710	117,8555	0,370416	0,453272	0,245151	0,051682	-0,097127	0,000173	0,000117	-4270,27	-18730,9	5,518850	1,757813	5,500493	S	2	1	1	2
76	3	100	300	321,9880	116,2700	0,361103	0,447174	0,242347	0,051682	-0,109565	0,000267	0,000282	-2128,11	-18878,9	5,265935	1,899414	5,775369	S	2	1	1	2
77	3	100	350	313,5930	114,6645	0,385711	0,441077	0,248730	0,039880	0,119621	0,000267	0,000328	-1669,89	-18345,9	5,227352	1,589814	4,739562	S	2	1	1	2
78	3	100	400	312,0670	113,6275	0,364113	0,437011	0,249496	0,013503	0,333601	0,000258	0,000374	-1659,37	-18169,9	5,19193	1,601663	5,443478	S	2	1	1	2

W tablicy decyzyjnej występuje podział atrybutów warunkowych na: warunki obróbki (parametry szlifowania), miary mikrogeometrii CPS, miary makrogeometrii CPS oraz miary chropowatości przedmiotu. Podział ten ma charakter czysto informacyjny i wynika z podziału zastosowanego w rozdziale 4. Analiza procesu za pomocą DRSA daje dowolność w konstruowaniu najlepszego wektora atrybutów warunkowych z punktu widzenia wybranego atrybutu decyzyjnego.

5.4. Klasyfikacja stanu procesu szlifowania wglębnego kłowego

Dane zwarte w tablicy decyzyjnej wykorzystano do klasyfikacji stanu procesu szlifowania wglębnego kłowego. Przyjmując poziom spójności $l = 1$, zastosowano algorytm klasyfikacji opracowany dla VC- DRSA (rozdział 5.2.5).

Reguły decyzyjne były indukowane za pomocą algorytmu VC-DomLEM [BiSS-11] dedykowanego dla DRSA i generującego minimalny zbiór reguł pokrywających wszystkie przypadki z tablicy decyzyjnej. Usunięcie z takiego zbioru dowolnej reguły powoduje, że nie wszystkie przypadki będą mogły być sklasyfikowane.

Wszystkie obliczenia związane z indukcją reguł decyzyjnych oraz analizę i weryfikację reguł przeprowadzono za pomocą programu jMAF [jMAF-11] opracowanego przez zespół prof. Romana Słowińskiego z Politechniki Poznańskiej. Program ten jest udostępniony przez jego twórców w Internecie pod adresem <http://www.cs.put.poznan.pl/jblaszczyński/Site/jRS.html>.

Zbiory minimalnych reguł decyzyjnych dla wszystkich kryteriów decyzyjnych mogą być wyznaczane z wykorzystaniem pełnego zbioru kryteriów warunkowych zawartych w tablicy decyzyjnej lub z wykorzystaniem jedynie podzbiorów atrybutów warunkowych ustalonych dla poszczególnych atrybutów decyzyjnych. Wyselekcjonowanie takich podzbiorów nie powinno być jednak arbitralne, lecz powinno być efektem przeprowadzenia procedury zapewniającej znalezienie zbiorów reguł decyzyjnych możliwie najlepiej klasyfikujących stan procesu. Przy zastosowaniu takiego podejścia, klasyfikacja stanu procesu służy jednocześnie przeprowadzeniu ilościowej oceny przydatności wyznaczonych miar sygnałów, czyli atrybutów warunkowych w tablicy decyzyjnej.

Podstawowym kryterium wyboru zestawu miar sygnałów jest minimalizacja ryzyka podjęcia błędnej decyzji o stanie procesu. Takie ogólne kryterium oceny skuteczności miar uwzględnia także wpływ algorytmu klasyfikacji i wówczas ocena przydatności miar jest również funkcją jakości klasyfikatora. Dlatego lepiej jest jeśli ocena ta jest dokonywana na etapie klasyfikacji stanu procesu za pomocą konkretnego klasyfikatora poprzez wyznaczanie różnego rodzaju wskaźników oceny klasyfikacji. Z tego powodu w następnych podrozdziałach oceny tej dokonano kolejno dla wszystkich

kryteriów oceny stanu procesu (atributów decyzyjnych w tablicy decyzyjnej) wykorzystując ideę reduktów i procedurę iteracyjną.

Proces indukcji oraz analizy reguł decyzyjnych rozpoczynano z zastosowaniem wszystkich wyznaczonych 17 atrybutów warunkowych. Następnie stosowano podzbiór atrybutów wyselekcjonowanych przez tzw. eksperta dziedzinowego, nazywany podzbiorem eksperckim. Rolę eksperta dziedzinowego pełnił autor tej pracy. W dalszej kolejności stosowano redukt zbioru eksperckiego lub nadzbiory tych reduktów, czyli redukt uzupełnione o wybrane przez eksperta atrybuty warunkowe. Procedura była powtarzana, aż możliwie najwyższa jakość klasyfikacji została osiągnięta.

Taka iteracyjna procedura selekcji atrybutów warunkowych została oparta o koncepcję reduktów rozszerzoną o metodę selekcji danych zwaną w języku angielskim „wrapper approach” [KoJo-97]. Autorzy tej metody udowodnili, że zredukowanie zbioru atrybutów warunkowych wyłącznie do atrybutów istotnie wpływających na dany atrybut decyzyjny nie jest równoznaczne ze znalezieniem zbioru optymalnego. Ze względu na współzależności zachodzące między atrybutami warunkowymi, często korzystniej jest uwzględnić atrybut formalnie mało istotny, a usunąć atrybut bardziej istotny. Wymaga to właśnie zastosowania procedury iteracyjnej, uwzględniającej podejście heurystyczne. Jest ono realizowane poprzez nadzorowanie procesu selekcji atrybutów przez eksperta dziedzinowego, który ten proces ukierunkowuje.

Otrzymane w procesie indukcji zbiory reguł decyzyjnych tworzą regułowy model procesu.

Pierwszym istotnym wynikiem, wspólnym dla wszystkich przeprowadzonych analiz jest stwierdzenie, że w tablicy decyzyjnej nie ma danych sprzecznych lub niespójnych, stąd dolne i górne przybliżenia odpowiednich złożań klas są sobie równe. Wynikają z tego dwa ważne wnioski:

- Jakość klasyfikacji jako podstawowa miara zbioru danych jest we wszystkich przeprowadzonych analizach równa 1,
- Wszystkie otrzymane reguły decyzyjne są regułami pewnymi.

Wnioski te zachowują swoją ważność dla wszystkich kolejno przeprowadzonych klasyfikacji.

Każdy wygenerowany zbiór reguł decyzyjnych ma służyć klasyfikacji nowych przypadków, a zatem musi być poddany weryfikacji i ocenie swej skuteczności. Służy temu wyznaczenie współczynnika trafności klasyfikacji, który jest procentowo wyrażonym stosunkiem liczby poprawnie sklasyfikowanych przypadków testowych do liczby wszystkich przypadków testowych (rozdział 5.2.3). Ponadto syntetycznej ocenie poprawności przeprowadzonej klasyfikacji służy tzw. macierz pomyłek, która informuje o liczbie przypadków poprawnie i błędnie zaklasyfikowanych do poszczególnych klas oraz o liczbie przypadków w ogóle niesklasyfikowanych.

Sposób podziału danych na zbiór uczący i testowy zależy od liczby dostępnych przypadków. Dla mniejszej liczby przypadków (poniżej 100) stosuje

się odmianę metody walidacji krzyżowej zwaną „leave-one-out” i właśnie tę metodę zastosowano we wszystkich przeprowadzonych analizach. Należy ona do metod stosujących podziały wielokrotne zbioru danych, w których błąd estymacji jest średnią błędów w poszczególnych grupach podziału. Walidacja „leave-one-out” jest metodą iteracyjną o liczbie iteracji n równej liczbie dostępnych przypadków. W każdej kolejnej iteracji $n-1$ przypadków stanowi zbiór uczący, a 1 przypadek stanowi zbiór testowy [KrSt-04, PiKR-09].

Tablica decyzyjna dla analizowanego procesu szlifowania wgłębnego kłowego zawiera 78 przypadków. W związku z tym, w zastosowanej walidacji krzyżowej we wszystkich przeprowadzonych analizach liczebność zbioru testowego wynosiła również 78.

Poniżej przedstawiono szczegółowe wyniki klasyfikacji dla kolejnych atrybutów decyzyjnych: D_1 , D_2 , D_3 , D_4 i D_5 .

5.4.1. Wyniki klasyfikacji dla formy zużywania się ściernicy

Złożenia klas formy zużywania się ściernicy i liczebność przypadków w tablicy decyzyjnej dla każdego złożenia są następujące:

- co najmniej klasa S ($\geq S$) – 54 przypadki,
- co najwyżej klasa T ($\leq T$) – 24 przypadki.

Wygenerowane reguły decyzyjne dla klasyfikacji z uwzględnieniem wszystkich atrybutów warunkowych przedstawia rys. 5.4. Znak „ $\leq$ ” pomiędzy „DECISION PART 1” a „CONDITION 1” oznacza „jeśli”. Atrybuty warunkowe nieposiadające skali preferencji („BRAK” w tabeli 5.5), a zatem te, dla których stosuje się dublowanie atrybutów, w regułach decyzyjnych oznaczone są „gNazwa” (zysk od ang. gain) i „cNazwa” (koszt od ang. cost), np. „gB_p” i „cB_p”. Zasady te odnoszą się również do wszystkich zestawów reguł prezentowanych na następnych rysunkach.

Number of rules: 5			
ID	DECISION PART 1	$\leq$	CONDITION 1
1	(zuzycie_sciernicy $\geq S$)	$\leq$	(gF_t ≥ 69.762)
2	(zuzycie_sciernicy $\geq S$)	$\leq$	(gEntropia_sklad_625_1250 ≥ -19520.483686)
3	(zuzycie_sciernicy $\leq T$)	$\leq$	(gEA_RMS_sr ≤ 2.731043)
4	(zuzycie_sciernicy $\leq T$)	$\leq$	(cEA_RMS_zm ≥ 13.0131)
5	(zuzycie_sciernicy $\leq T$)	$\leq$	(gF_n ≤ 115.213)

Rys. 5.4. Reguły decyzyjne dla klasyfikacji formy zużywania się ściernicy przy uwzględnieniu wszystkich atrybutów warunkowych (wydruk z programu jMAF)

Wyniki oceny klasyfikacji formy zużywania się ściernicy przy uwzględnieniu wszystkich atrybutów warunkowych za pomocą omówionych wyżej wskaźników podano w tabeli 5.7.

Tabela 5.7. Ocena klasyfikacji formy zużywania się ściernicy przy uwzględnieniu wszystkich atrybutów warunkowych

TRAFNOŚĆ KLASYFIKACJI		
Liczba przypadków sklasyfikowanych prawidłowo	Liczba przypadków sklasyfikowanych nieprawidłowo	Liczba przypadków w ogóle niesklasyfikowanych
73 (93,590%)	0 (0,000%)	5 (6,410%)
MACIERZ POMYŁEK KLASYFIKACJI		
Rzeczywista klasa przypadków	Dokonany przydział do klasy	
	T	S
	Liczba przypadków	
T	21	0
S	0	52
Współczynnik trafności klasyfikacji: 93,590%		

Otrzymana trafność klasyfikacji powyżej 90% oraz brak błędnych przydziałów do poszczególnych klas pozwalają ocenić uzyskane wyniki klasyfikacji jako ogólnie dobre. Jednak bardziej szczegółowa analiza otrzymanych reguł decyzyjnych wskazuje na możliwości jego poprawy. Tylko 5 reguł jest niezbędnych do dokonania pełnej klasyfikacji i wykorzystują one tylko 4 spośród 17 atrybutów warunkowych. Nasuwa się wniosek, że lepszą trafność klasyfikacji można byłoby uzyskać poprzez ograniczenie zbioru atrybutów warunkowych. Na uwagę zasługuje również fakt, że wśród wykorzystanych atrybutów warunkowych nie ma parametrów szlifowania. Wykorzystywane atrybuty są miarami sygnałów składowej normalnej i stycznej siły szlifowania, drgań oraz wartości skutecznej emisji akustycznej.

Kierując się powyższymi uwagami oraz wnioskami z doświadczalnej oceny poszczególnych atrybutów warunkowych (rozdział 4), w dalszych poszukiwaniach najkorzystniejszego wektora tych atrybutów do klasyfikacji formy zużywania się ściernicy zastosowano zbiór ekspercki. Powstał on w ten sposób, że ze zbioru wszystkich atrybutów warunkowych usunięto atrybuty należące do miar makrogeometrii CPS oraz wskaźnik B_p . Z analizy tablicy decyzyjnej wynika, że nie ma wyraźnej korelacji między tą grupą miar a formą zużywania się ściernicy, co potwierdza również analiza teoretyczna procesu szlifowania. Poza tym wskaźnik B_p jest funkcją F_t i q , więc uwzględnienie tych dwóch ostatnich atrybutów pośrednio uwzględnia B_p .

W wyniku klasyfikacji przeprowadzonej dla eksperckiego zbioru atrybutów warunkowych otrzymano zestaw 6-ciu reguł decyzyjnych, trafność klasyfikacji równą 91,026% oraz 1 przypadek sklasyfikowany nieprawidłowo i 6 przypadków w ogóle niesklasyfikowanych. Ogólnie są to więc wyniki gorsze niż dla klasyfikacji z uwzględnieniem wszystkich atrybutów warunkowych. Ponadto dla klasyfikacji z uwzględnieniem eksperckiego zbioru atrybutów otrzymano 324 redukty. Dla 6 spośród nich trafność klasyfikacji wynosiła powyżej 90%.

Najwyższą trafność klasyfikacji równą 97,436% uzyskano dla reduktu nr 38 i 320. Pierwszy z nich składa się wyłącznie z parametrów szlifowania: Q'_w , q i z właściwego ubytku materiału obrabianego typu zysk gV'_w . Oznacza to, że generowane przez proces zakłócenia nie decydowały o tym, czy podczas szlifowania przeważało zjawisko tępienia czy samoostrzenia ściernicy. Forma zużywania się ściernicy była zdeterminowana przez właściwy ubytek materiału obrabianego V'_w , a także przez parametry nastawne oraz charakterystykę zastosowanej ściernicy i szlifowalność materiału obrabianego. Jednak dopiero przeprowadzenie badań doświadczalnych z szerszym zakresem wielkości wejściowych pozwoliłoby na nadanie tym wnioskom odpowiednio ogólnego charakteru. Z tego względu bardziej wiarygodny wydaje się być redukt nr 320 składający się z parametrów nastawnych Q'_w i q oraz ze współczynnika zdolności skrawnej ściernicy typu koszt cK_z .

W celu poszukiwania wyższej trafności klasyfikacji formy zużywania się ściernicy, dla obu wymienionych reduktów utworzono nadzbiory. Redukt nr 38 uzupełniono o cV_w , a redukt 320 o gV_w . W obu przypadkach uzyskano jednako podwyższoną trafność klasyfikacji do 98,718% i taki sam zbiór 6 reguł przedstawiony na rys. 5.5.

Na uwagę zasługuje fakt, że w otrzymanym zestawie reguł w obu przypadkach nie występuje parametr, o który rozszerzono pierwotnie otrzymane redukt. Wyniki walidacji są jednak wyższe ze względu na możliwość wykorzystania tych parametrów w regułach w co najmniej jednej iteracji podczas szacowania zdolności predykcyjnej modelu testem „leave-one-out”.

Number of rules: 6					
ID	DECISION PART 1	<=	CONDITION 1		CONDITION 2
1	{zuzycie_sciernicy >= S}	<=	{Q_w = 2}		
2	{zuzycie_sciernicy >= S}	<=	{Q_w = 3}		
3	{zuzycie_sciernicy >= S}	<=	{q = 400}	&	{gV_w >= 350.0}
4	{zuzycie_sciernicy <= T}	<=	{Q_w = 1}	&	{gV_w <= 300.0}
5	{zuzycie_sciernicy <= T}	<=	{Q_w = 1}	&	{q = 60}
6	{zuzycie_sciernicy <= T}	<=	{Q_w = 1}	&	{q = 100}

Rys. 5.5. Reguły decyzyjne dla klasyfikacji formy zużywania się CPS przy uwzględnieniu reduktu $\{Q'_w, q, gV_w, cV_w\}$ lub $\{Q'_w, q, gV_w, cK_z\}$ (wydruk z programu jMAF)

Jako najlepszy z możliwych do uzyskania uznano redukt składający się z parametrów nastawnych Q'_w i q , właściwego ubytku materiału obrabianego typu zysk gV'_w oraz ze współczynnika zdolności skrawnej ściernicy typu koszt cK_z . W wyniku klasyfikacji dla takiego zbioru atrybutów warunkowych otrzymano 1 przypadek jako niesklasyfikowany, natomiast pozostałe przypadki zostały sklasyfikowane prawidłowo. Podsumowanie klasyfikacji z wykorzystaniem tego zbioru atrybutów warunkowych podano w tabeli 5.8.

Tabela 5.8. Ocena klasyfikacji formy zużywania się ściernicy dla reduktu $\{Q_w, q, gV_w, cK_z\}$ o najwyższej trafności klasyfikacji

TRAFNOŚĆ KLASYFIKACJI		
Liczba przypadków sklasyfikowanych prawidłowo	Liczba przypadków sklasyfikowanych nieprawidłowo	Liczba przypadków w ogóle niesklasyfikowanych
77 (98,718%)	0 (0,000%)	1 (1,282%)
MACIERZ POMYŁEK KLASYFIKACJI		
Rzeczywista klasa przypadków	Dokonany przydział do klasy	
	T	S
	Liczba przypadków	
T	24	0
S	0	53
Współczynnik trafności klasyfikacji: 98,718%		

5.4.2. Wyniki klasyfikacji dla makrogeometrii CPS

Złożenia klas makrogeometrii CPS i liczność przypadków w tablicy decyzyjnej dla każdego złożenia są następujące:

- co najmniej klasa 1 (≥ 1) – 46 przypadków,
- co najwyżej klasa 2 (≤ 2) – 32 przypadki.

Klasyfikacja stanu makrogeometrii CPS przeprowadzona z uwzględnieniem wszystkich atrybutów warunkowych nie przyniosła zadawalających rezultatów. Wygenerowany został zestaw 15-tu reguł decyzyjnych, w których wystąpiły prawie wszystkie atrybuty warunkowe. Aż 9 przypadków zostało błędnie sklasyfikowanych oraz również 9 w ogóle nie zostało sklasyfikowanych. Trafność klasyfikacji wyniosła 76,923%.

Analiza teoretyczno-doświadczalna wykazała (rozdziały 3.21 i 4.5), że makrogeometria CPS objawiająca się falistością ściernicy jest bardzo dobrze skorelowana z sygnałami drgań i wartości skutecznej EA. Wobec tego poszukiwania lepszych wyników klasyfikacji stanu makrogeometrii CPS oparto na atrybutach warunkowych będących różnymi miarami tych sygnałów. Wybrano trzy podzbiory atrybutów:

Podzbiór 1 = $\{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_8, C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{17}\}$,

Podzbiór 2 = $\{C_1, C_2, C_3, C_8, C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{17}\}$,

Podzbiór 3 = $\{C_1, C_2, C_3, C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{17}\}$.

Najlepsze wyniki uzyskano dla podzbioru nr 3, dla którego trafność klasyfikacji wyniosła 80,769%. Z podzbioru tego wygenerowano 23 redukty. Najwyższą trafność klasyfikacji równą 87,179% uzyskano dla reduktu nr 14 składającego się z następujących atrybutów warunkowych: $\{C_1 = Q'_w, C_2 = q, C_{11} = Sr_M_W_600_1000 \text{ Hz}, C_{12} = Sr_M_W_1200_2000 \text{ Hz}, C_{17} = cEA_RMS_zm\}$. 4 przypadki zostały błędnie sklasyfikowane, a 6

w ogóle nie zostało sklasyfikowanych. Ponieważ w redukcje tym nie występuje żadna miara związana z analizą falkową, przeprowadzono dodatkowo klasyfikację z wykorzystaniem tego reduktu rozszerzonego o warunek C_{13} , czyli o entropię składowych DWT drgań w zakresie 1875-2500 Hz. Dla tak skonstruowanego zbioru atrybutów warunkowych uzyskano najlepszy wynik klasyfikacji stanu makrogeometrii CPS równy 89,744%.

Reguły decyzyjne wygenerowane dla zbioru atrybutów warunkowych $\{C_1, C_2, C_{11}, C_{12}, C_{13}, cC_{17}\}$ o najwyższej trafności klasyfikacji dla stanu makrogeometrii CPS przedstawiono na rys. 5.6, natomiast wyniki oceny tej klasyfikacji podano w tabeli 5.9.

Number of rules: 9					
ID	DECISION PART 1	<=	CONDITION 1	CONDITION 2	CONDITION 3
1	(stan_makro_CPS)=1	<=	(Sr_M_W_600_1000_x1000 <= 0.052003)	& (Sr_M_W_1200_2000_x1000 <= 0.057067)	
2	(stan_makro_CPS)=1	<=	(Sr_M_W_600_1000_x1000 <= 0.06174)	& (cEA_RMS_zm <= 7.29041)	
3	(stan_makro_CPS)=1	<=	(q=400)	& (Entropia_sklad_1875_2500 <= -3709.354539)	
4	(stan_makro_CPS)=1	<=	(Q_w=2)	& (q=100)	& (Sr_M_W_600_1000_x1000 <= 0.212465) & (Sr_M_W_1200_2000_x1000 <= 0.278944)
5	(stan_makro_CPS)=2	<=	(Sr_M_W_1200_2000_x1000)=0.261637		
6	(stan_makro_CPS)=2	<=	(Sr_M_W_600_1000_x1000)=0.219779		
7	(stan_makro_CPS)=2	<=	(Q_w=3)	& (Sr_M_W_600_1000_x1000)=0.123433	
8	(stan_makro_CPS)=2	<=	(q=60)	& (Sr_M_W_600_1000_x1000)=0.083852	
9	(stan_makro_CPS)=2	<=	(Sr_M_W_1200_2000_x1000)=0.063081	& (cEA_RMS_zm)=7.67326	

Rys. 5.6. Reguły decyzyjne dla klasyfikacji stanu makrogeometrii CPS przy uwzględnieniu zbioru atrybutów warunkowych $\{C_1, C_2, C_{11}, C_{12}, C_{13}, cC_{17}\}$ o najwyższej trafności klasyfikacji (wydruk z programu jMAF)

Tabela 5.9. Ocena klasyfikacji stanu makrogeometrii CPS przy uwzględnieniu zbioru atrybutów warunkowych $\{C_1, C_2, C_{11}, C_{12}, C_{13}, cC_{17}\}$ o najwyższej trafności klasyfikacji

TRAFNOŚĆ KLASYFIKACJI		
Liczba przypadków sklasyfikowanych prawidłowo	Liczba przypadków sklasyfikowanych nieprawidłowo	Liczba przypadków w ogóle niesklasyfikowanych
70 (89,744%)	5 (6,410%)	3 (3,846%)
MACIERZ POMYŁEK KLASYFIKACJI		
Rzeczywista klasa przypadków	Dokonany przydział do klasy	
	2	1
	Liczba przypadków	
2	28	3
1	2	42
Współczynnik trafności klasyfikacji: 89,744%		

Podsumowując klasyfikację stanu makrogeometrii CPS należy zauważyć, że jej wyniki są zgodne z wnioskami przeprowadzonej wcześniej analizy teoretyczno-doświadczalnej zjawisk dynamicznych zachodzących podczas szlifowania wgłębnego kłowego. Teoria dynamiki procesu szlifowania jest już obecnie bardzo dobrze opracowana w stosunku do innych zagadnień teorii szlifowania i dlatego łatwiej jest ustalić prawidłowe zależności między wielkościami wejściowymi i wynikami procesu w tym zakresie. Można byłoby się więc spodziewać trafności klasyfikacji na wyższym poziomie niż uzyskane blisko 90%. Prawdopodobnie jest to możliwe poprzez udoskonalenie metody przydziału stanu makrogeometrii CPS do klas decyzyjnych dla poszczególnych przypadków.

5.4.3. Wyniki klasyfikacji dla mikrogeometrii CPS

Złożenia klas mikrogeometrii CPS i licznosc przypadków w tablicy decyzyjnej dla każdego złożenia są następujące:

- co najmniej klasa 1 (≥ 1) – 62 przypadków,
- co najwyżej klasa 2 (≤ 2) – 16 przypadków.

Dla klasyfikacji stanu mikrogeometrii CPS przeprowadzonej z uwzględnieniem wszystkich atrybutów warunkowych uzyskano wyniki na relatywnie niskim poziomie. Wygenerowany został zestaw 23-ech reguł decyzyjnych, w których wystąpiły prawie wszystkie atrybuty warunkowe. Błędnie zostało sklasyfikowanych 11 przypadków, a aż 21 nie zostało sklasyfikowanych w ogóle. Trafność klasyfikacji wyniosła 58,974%.

Z przeprowadzonej analizy teoretyczno-doświadczalnej (rozdziały 3.2.2 i 4.6) wynika, że mikrogeometria CPS powinna być skorelowana z miarami pochodnymi od siły szlifowania i sygnału EA. Z tego względu w dalszych analizach ograniczono zbiór atrybutów warunkowych do tych właśnie miar. Podzbiór takich atrybutów jest następujący: $\{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9, C_{10}, C_{15}, C_{16}, C_{17}\}$.

Dla przedstawionego wyżej eksperckiego podzbioru atrybutów warunkowych uzyskano trochę lepsze wyniki klasyfikacji. Wygenerowany został zestaw 20 reguł decyzyjnych, błędnie zostało sklasyfikowanych 10 przypadków, 21 nie zostało sklasyfikowanych w ogóle, a trafność klasyfikacji wyniosła 62,821%. Uzyskano aż 643 redukty dla tego podzbioru generujących w większości przypadków dużą liczbę reguł decyzyjnych, co oznacza, że są to reguły stosunkowo słabe i o małym wsparciu (rozdział 5.2.3). Związana jest z tym również duża liczba przypadków niesklasyfikowanych. Przyczyną takich wyników jest nierównomierny rozkład przypadków w klasach (16 do 62) oraz brak regularności występowania poszczególnych klas dla różnych zestawów parametrów szlifowania. Wynika to z tego, że trafność klasyfikowania jest miarą wrażliwą na rozkład klas [Stef-01]. W takich sytuacjach celem analizy powinno być uzyskanie klasyfikacji o możliwie wysokiej zdolności predykcyjnej dla

klasy najmniej licznej, a za miarę zdolności predykcyjnej modelu można przyjąć tzw. wrażliwość, którą wyznacza się w ramach każdej klasy [Stef-01]. Jest ona określona współczynnikiem TPR (ang. True Positive Rate), który jest stosunkiem prawidłowo sklasyfikowanych przypadków z danej klasy do liczby wszystkich sklasyfikowanych przypadków z tej klasy. A zatem TPR pomija przypadki niesklasyfikowane. Wartość TPR dla pełnego zbioru atrybutów warunkowych osiągnęła zaledwie 0,18 i 0,30 dla podzbioru eksperckiego.

Z punktu widzenia opisanych wyżej kryteriów, najlepsze wyniki klasyfikacji uzyskano dla reduktu nr 643 $\{Q'_w, q, gV'_w, cV'_w\}$. Trafność klasyfikacji wyniosła 75,641%, TPR dla klasy 1 równy 1, dla klasy 2 równy 0,64 i liczba przypadków niesklasyfikowanych równa 15 (10 dla klasy 1 i 5 dla klasy 2). Dalsze poszukiwania przeprowadzono dla tego reduktu powiększonego o miary pochodne od składowych siły szlifowania. Najlepsze wyniki klasyfikacji uzyskano dla reduktu nr 643 powiększonego o stosunek składowej stycznej do składowej normalnej siły szlifowania μ . Trafność klasyfikacji wyniosła 80,769%, TPR dla klasy 1 równy 0,95, dla klasy 2 równy 0,75 i liczba przypadków niesklasyfikowanych równa 9 (5 dla klasy 1 i 4 dla klasy 2). Zbiór wygenerowanych reguł decyzyjnych oraz zbiorczą ocenę tej klasyfikacji pokazują odpowiednio rys. 5.7 i tabela 5.10.

Number of rules: 14						
ID	DECISION PART 1	<=	CONDITION 1	CONDITION 2	CONDITION 3	CONDITION 4
1	(stan_mikro_CPS >= 1)	<=	(Mi <= 0.376836)			
2	(stan_mikro_CPS >= 1)	<=	(q = 60)	&	(cV_w <= 250.0)	
3	(stan_mikro_CPS >= 1)	<=	(Q_w = 3)	&	(q = 60)	
4	(stan_mikro_CPS >= 1)	<=	(gV_w >= 350.0)	&	(Mi <= 0.459442)	
5	(stan_mikro_CPS >= 1)	<=	(Q_w = 2)	&	(Mi <= 0.448655)	
6	(stan_mikro_CPS >= 1)	<=	(cV_w <= 100.0)	&	(Mi <= 0.465072)	
7	(stan_mikro_CPS >= 1)	<=	(Q_w = 2)	&	(q = 100)	& (Mi <= 0.521471)
8	(stan_mikro_CPS >= 1)	<=	(Q_w = 1)	&	(q = 400)	& (gV_w >= 150.0)
9	(stan_mikro_CPS <= 2)	<=	(gV_w <= 100.0)	&	(Mi >= 0.522381)	
10	(stan_mikro_CPS <= 2)	<=	(Q_w = 1)	&	(q = 100)	& (Mi >= 0.486512)
11	(stan_mikro_CPS <= 2)	<=	(Q_w = 2)	&	(q = 400)	& (cV_w >= 150.0) & (Mi >= 0.456435)
12	(stan_mikro_CPS <= 2)	<=	(Q_w = 3)	&	(q = 100)	& (gV_w <= 200.0) & (cV_w >= 150.0)
13	(stan_mikro_CPS <= 2)	<=	(q = 60)	&	(cV_w >= 300.0)	& (Mi >= 0.457976)
14	(stan_mikro_CPS <= 2)	<=	(Q_w = 1)	&	(q = 60)	& (gV_w <= 300.0) & (cV_w >= 300.0)

Rys. 5.7. Reguły decyzyjne dla klasyfikacji stanu mikrogeometrii CPS przy uwzględnieniu zbioru atrybutów warunkowych $\{C_1, C_2, gC_3, cC_3, C_6\}$ o najlepszych wynikach klasyfikacji (wydruk z programu jMAF)

Biorąc pod uwagę jedynie wartość współczynnika trafności klasyfikacji, ocena wyników klasyfikacji stanu mikrogeometrii CPS nie jest zadowalająca. Jednak jeżeli wziąć pod uwagę pewne uwarunkowania nadzorowania mikrogeometrii CPS, to klasyfikacja ta może być oceniona wysoko. W praktycznych zastosowaniach procesu szlifowania niezwykle trudno jest precyzyjnie określić, kiedy stan mikrogeometrii CPS jest już niedopuszczalny. Dlatego 2 klasa atrybutu decyzyjnego dla mikrogeometrii CPS została określona jedynie jako

„stan niezadowolający”, a nie niedopuszczalny. W tej sytuacji korzystniejszy jest brak przydziału do jednej z klas decyzyjnych niż przydział błędny. Jest to również zgodne z postulatem, że w sytuacji nierównomiernego rozkładu przypadków w klasach ważne znaczenie ma wartość TPR, który pomija przypadki niesklasyfikowane.

Tabela 5.10. Ocena klasyfikacji stanu mikroteometrii CPS przy uwzględnieniu zbioru atrybutów warunkowych $\{C_1, C_2, gC_3, cC_3, C_6\}$ o najwyższej trafności klasyfikacji

TRAFNOŚĆ KLASYFIKACJI		
Liczba przypadków sklasyfikowanych prawidłowo	Liczba przypadków sklasyfikowanych nieprawidłowo	Liczba przypadków w ogóle niesklasyfikowanych
63 (80,769%)	6 (7,692%)	9(11,538%)
MACIERZ POMYŁEK KLASYFIKACJI		
Rzeczywista klasa przypadków	Dokonany przydział do klasy	
	2	1
	Liczba przypadków	
2	9	3
1	3	54
Współczynnik trafności klasyfikacji: 80,769%		

W omawianej klasyfikacji w ogóle nie zostało sklasyfikowanych 9 przypadków, czyli około 11,5%. Wśród przypadków, które zostały przydzielone do klas, trafność wynosi 91,304% (63 do 69 przypadków). Jeśli model przydziela stan mikroteometrii do 1 klasy, to decyzja jest poprawna w 94,737% (54 do 57 przypadków), a jeśli do 2 klasy, to w 81,25% (6 do 12 przypadków).

5.4.4. Wyniki klasyfikacji dla uszkodzeń cieplnych WW przedmiotu

Złożenia klas uszkodzeń cieplnych WW przedmiotu szlifowanego i licznosc przypadków w tablicy decyzyjnej dla każdego złożenia są następujące:

- co najwyżej klasa 3 (≤ 3), 8 przypadków,
- co najwyżej klasa 2 (≤ 2), 20 przypadków,
- co najmniej klasa 2 (≥ 2), 70 przypadków,
- co najmniej klasa 1 (≥ 1), 58 przypadków.

Wyniki klasyfikacji z uwzględnieniem wszystkich atrybutów warunkowych są bardzo dobre. Trafność klasyfikacji wynosi 98,718%, natomiast zbiór reguł decyzyjnych zawiera jedynie 4 reguły biorące pod uwagę wartości tylko 2 atrybutów warunkowych – wskaźnika B_p i stosunku prędkości q . Wynika to z tego, że przydział stanu uszkodzeń cieplnych WW przedmiotu do jednej z 3 klas decyzyjnych w tablicy decyzyjnej został dokonany na podstawie

ogłędzin powierzchni szlifowanej i wartości wskaźnika B_p . Tak więc przydział do klasy był jawną funkcją jednego z atrybutów warunkowych. Równie dobry wynik – trafność klasyfikacji równą 98,718% i tylko 4 reguły decyzyjne – uzyskano dla zbioru atrybutów warunkowych uwzględniającego wyłącznie wskaźnik B_p . Jednak wyniki te można potraktować jedynie jako potwierdzenie poprawności działania algorytmu indukcji reguł. Potwierdzają one wniosek z rozdziału 4.7 mówiący, że do nadzorowania uszkodzeń cieplnych WW przedmiotu szlifowanego wystarczająca jest znajomość wartości wskaźnika B_p i wyznaczenie jego poziomu granicznego.

Biorąc pod uwagę powyższe uwagi, utworzono podzbiór ekspercki niezawierający miar makrogeometrii CPS oraz miar związanych ze współczynnikiem B_p , czyli składowej stycznej F_t i współczynnika μ określającego stosunek tej składowej do składowej normalnej. Założono, że przydatnym zastosowaniem DRSA byłoby znalezienie podzbioru atrybutów warunkowych niezawierającego atrybutów pochodnych od siły szlifowania, dla którego wynik klasyfikacji stanu uszkodzeń cieplnych byłby porównywalny z wynikiem nadzorowania z wykorzystaniem wskaźnika B_p . Można byłoby wówczas zrezygnować z trudnego do instalacji układu pomiaru siły. Wśród otrzymanych 197 reduktów znaleziono dwa takie podzbiory atrybutów warunkowych.

Redukt nr 197, dla którego uzyskano 100% trafności klasyfikacji składa się tylko z właściwej wydajności objętościowej Q_w i stosunku prędkości q . W zbiorze tym nie ma żadnego atrybutu uwzględniającego zmianę wartości granicznych akceptowalnego obszaru szlifowania spowodowanej upływem okresu trwałości ściernicy (rozdział 3.1 i rys. 3.7). Wynika to z zastosowanego podczas badań doświadczalnych rozłożenia wartości Q_w i q (rys. 4.3). Praktyczne znaczenie tego zbioru ogranicza się zatem do tego określonego przypadku.

Na uwagę zasługiwał natomiast redukt nr 88 składający się z Q_w , cV_w i cEA_{RMS_sr} (średnia wartość EA_{RMS} traktowana jako koszt). Uzyskany zbiór reguł decyzyjnych zawiera 9 reguł przedstawionych na rys. 5.8, natomiast ocena tej klasyfikacji zawarta jest w tabeli 5.11.

Number of rules: 9					
ID	DECISION PART 1	<=	CONDITION 1	CONDITION 2	CONDITION 3
1	(uszkodz_cieplne >= 1)	<=	(cEA_RMS_sr <= 2.731043)		
2	(uszkodz_cieplne >= 1)	<=	(Q_w = 3)		
3	(uszkodz_cieplne >= 1)	<=	(Q_w = 2)	& (cEA_RMS_sr <= 4.055101)	
4	(uszkodz_cieplne >= 1)	<=	(Q_w = 2)	& (cV_w <= 250.0)	& (cEA_RMS_sr <= 4.18379)
5	(uszkodz_cieplne >= 2)	<=	(cEA_RMS_sr <= 4.055101)		
6	(uszkodz_cieplne >= 2)	<=	(cV_w <= 250.0)	& (cEA_RMS_sr <= 4.18379)	
7	(uszkodz_cieplne <= 3)	<=	(Q_w = 2)	& (cEA_RMS_sr >= 4.235812)	
8	(uszkodz_cieplne <= 3)	<=	(Q_w = 2)	& (cV_w >= 350.0)	& (cEA_RMS_sr >= 4.151761)
9	(uszkodz_cieplne <= 2)	<=	(Q_w = 1)	& (cEA_RMS_sr >= 2.930999)	

Rys. 5.8. Reguły decyzyjne dla klasyfikacji stanu uszkodzeń cieplnych WW przedmiotu przy uwzględnieniu zbioru atrybutów warunkowych $\{Q_w, cV_w, cEA_{RMS_sr}\}$ o trafności klasyfikacji 92,308% (wydruk z programu jMAF)

Tabela 5.11. Ocena klasyfikacji stanu uszkodzeń cieplnych WW przedmiotu przy uwzględnieniu zbioru atrybutów warunkowych $\{Q'_w, cV_w, cEA_{RMS_sr}\}$

TRAFNOŚĆ KLASYFIKACJI			
Liczba przypadków sklasyfikowanych prawidłowo	Liczba przypadków sklasyfikowanych nieprawidłowo		Liczba przypadków w ogóle niesklasyfikowanych
72 (92,308%)	2 (2,564%)		4 (5,128%)
MACIERZ POMYŁEK KLASYFIKACJI			
Rzeczywista klasa przypadków	Dokonany przydział do klasy		
	3	2	1
	Liczba przypadków		
3	5	0	0
2	0	12	0
1	1	1	55
Współczynnik trafności klasyfikacji: 92,308%			

Uzyskana trafność klasyfikacji 92,308% jest wysoka, ale pozostałe wyniki klasyfikacji wymagają komentarza.

W klasyfikacji uszkodzeń cieplnych WW, podobnie jak w klasyfikacji mikrogeometrii CPS, występuje nierównomierny rozkład przypadków w klasach. W takich sytuacjach do oceny jakości klasyfikacji powinien być również zastosowany współczynnik TPR, który jest stosunkiem prawidłowo sklasyfikowanych przypadków z danej klasy do liczby wszystkich sklasyfikowanych przypadków z tej klasy. Dla rozpatrywanego podzbioru atrybutów warunkowych, współczynniki te dla klas 3, 2 i 1 osiągnęły odpowiednio 1, 1 i 0,96, a więc bardzo zadawalające wartości. Należy jednak zauważyć, że w tablicy decyzyjnej osiem przypadków zaliczono do 3 klasy decyzyjnej, czyli we wszystkich tych przypadkach wystąpiły wyraźne przypalenia powierzchni szlifowanej. Tymczasem w wyniku omawianej klasyfikacji tylko pięć przypadków zostało zaliczonych prawidłowo do 3 klasy, a pozostałe trzy w ogóle nie zostały sklasyfikowane. Dodatkowo do 3 klasy został mylnie zaklasyfikowany jeden przypadek należący w rzeczywistości do klasy 1. Niepokojący jest brak wykrycia uszkodzeń cieplnych WW w trzech przypadkach.

W przeciwieństwie do mikrogeometrii CPS, uszkodzenia cieplne powierzchni szlifowanej są bardzo ostrym kryterium oceny jakości szlifowania. Wystąpienie przypaleń powierzchni dyskwalifikuje proces szlifowania, a zatem nie można dopuścić do błędnych ocen w tym zakresie. Wynika z tego, że chociaż klasyfikacja uszkodzeń cieplnych WW przedmiotu szlifowanego bez uwzględnienia wartości wskaźnika B_p dała dobre wskaźniki formalne, to z punktu widzenia jakości przedmiotu po szlifowaniu może powodować zastrzeżenia.

5.4.5. Wyniki klasyfikacji chropowatości powierzchni szlifowanej

Złożenia klas chropowatości powierzchni szlifowanej i liczność przypadków w tablicy decyzyjnej dla każdego złożenia są następujące:

- co najwyżej klasa 3 (≤ 3), 16 przypadków,
- co najwyżej klasa 2 (≤ 2), 38 przypadków,
- co najmniej klasa 2 (≥ 2), 62 przypadki,
- co najmniej klasa 1 (≥ 1), 40 przypadków.

W wyniku klasyfikacji chropowatości powierzchni szlifowanej przeprowadzonej z uwzględnieniem wszystkich atrybutów warunkowych wygenerowany został zestaw 14-tu reguł decyzyjnych, w których występuje większość atrybutów warunkowych. 8 przypadków zostało błędnie sklasyfikowanych, a 5 w ogóle nie zostało sklasyfikowanych. Trafność klasyfikacji wyniosła 83,333%. Oceniono, że wyniki te można poprawić poprzez wyselekcjonowanie odpowiedniego zbioru atrybutów warunkowych.

Doboru najlepszego podzbioru atrybutów decyzyjnych do klasyfikacji chropowatości, tak jak w przypadku poprzednich atrybutów decyzyjnych, dokonano w oparciu o teoretyczno-doświadczałą analizę przeprowadzoną w rozdziale 4. Wynika z niej, że na chropowatość powierzchni szlifowanej mają wpływ parametry szlifowania, parametry opisu mikrogeometrii CPS, drgania i uszkodzenia cieplne WW przedmiotu. Wobec tego zbiór atrybutów warunkowych powinien się składać z parametrów obróbki, miar EA_{RMS} przydzielonych w tablicy decyzyjnej do grupy miar chropowatości, miar FFT drgań, wskaźnika B_p oraz współczynnika zdolności skrawnej ściernicy K_z . Taki zbiór atrybutów warunkowych oraz jego reduktów posłużył do wyznaczenia możliwie najlepszego zbioru atrybutów warunkowych do klasyfikacji chropowatości powierzchni szlifowanej.

Z omówionego wyżej zbioru atrybutów warunkowych otrzymano 66 reduktów. Trafność klasyfikacji powyżej 90% uzyskano dla dwóch z nich:

REDUKT Nr 53: $\{Q_w, cV_w, B_p, EA_{RMS_średnia}\}$ – TK = 92,308%,

REDUKT Nr 66: $\{Q_w, q, cV_w\}$ – TK = 94,872%.

Spodziewając się jeszcze lepszych wyników, przeprowadzono klasyfikację z wykorzystaniem czterech dodatkowych zbiorów, będących kombinacją reduktu nr 66 i atrybutów najczęściej występujących w reduktach:

1. $\{Q_w, q, cV_w, B_p, EA_{RMS_średnia}\}$ – TK = 94,872%,

2. $\{Q_w, q, cV_w, B_p\}$ – TK = 96,154%,

3. $\{Q_w, q, cV_w, EA_{RMS_średnia}\}$ – TK = 93,590%,

4. $\{Q_w, cV_w, B_p, \dot{S}r_M_W_600_1000Hz, \dot{S}r_M_W_1200_2000Hz\}$ – TK = 87,179%.

Najwyższą trafność klasyfikacji równą 96,154% otrzymano dla zbioru $\{Q_w, q, cV_w, B_p\}$. Wygenerowane dla tego zbioru reguły decyzyjne przedstawia rys. 5.9, natomiast ocenę tej klasyfikacji prezentuje tabela 5.12.

Trafność klasyfikacji dla pozostałych z prezentowanych wyżej zbiorów jest zbliżona. A zatem mogą być one alternatywnie wykorzystane. Ponadto skład tych zbiorów potwierdza zależność chropowatości szlifowanej powierzchni od parametrów obróbki, EA_{RMS} , drgań i wskaźnika B_p .

Number of rules: 14					
ID	DECISION PART 1	<=	CONDITION 1	CONDITION 2	CONDITION 3
1	[chropowatosc >= 1]	<=	[Q_w = 1]	& [cV_w <= 450.0]	
2	[chropowatosc >= 1]	<=	[Q_w = 1]	& [q = 400]	& [cV_w <= 500.0]
3	[chropowatosc >= 1]	<=	[q = 100]	& [cV_w <= 200.0]	
4	[chropowatosc >= 1]	<=	[cV_w <= 250.0]	& [B_p <= 0.253608]	
5	[chropowatosc >= 2]	<=	[Q_w = 1]		
6	[chropowatosc >= 2]	<=	[B_p <= 0.253608]		
7	[chropowatosc >= 2]	<=	[q = 100]		
8	[chropowatosc <= 3]	<=	[B_p >= 1.683111]		
9	[chropowatosc <= 3]	<=	[Q_w = 3]	& [q = 60]	
10	[chropowatosc <= 2]	<=	[cV_w >= 550.0]		
11	[chropowatosc <= 2]	<=	[q = 60]	& [cV_w >= 500.0]	
12	[chropowatosc <= 2]	<=	[Q_w = 3]	& [cV_w >= 250.0]	
13	[chropowatosc <= 2]	<=	[Q_w = 2]	& [cV_w >= 300.0]	
14	[chropowatosc <= 2]	<=	[Q_w = 2]	& [B_p >= 0.406522]	

Rys. 5.9. Reguły decyzyjne dla klasyfikacji chropowatości powierzchni szlifowanej przy uwzględnieniu zbioru atrybutów warunkowych $\{Q_w, q, cV_w, B_p\}$ o trafności klasyfikacji 96,154% (wydruk z programu jMAF)

Tabela 5.12. Ocena klasyfikacji chropowatości powierzchni szlifowanej przy uwzględnieniu zbioru atrybutów warunkowych $\{Q_w, q, cV_w, B_p\}$

TRAFNOŚĆ KLASYFIKACJI			
Liczba przypadków sklasyfikowanych prawidłowo	Liczba przypadków sklasyfikowanych nieprawidłowo	Liczba przypadków w ogóle niesklasyfikowanych	
75 (96,154%)	3 (3,846%)	0 (0,000%)	
MACIERZ POMYŁEK KLASYFIKACJI			
Rzeczywista klasa przypadków	Dokonany przydział do klasy		
	3	2	1
	Liczba przypadków		
	3	16	0
2	0	21	1
1	0	2	38
Współczynnik trafności klasyfikacji: 96,154%)			

5.5. Podsumowanie zastosowania teorii zbiorów przybliżonych do klasyfikacji stanu procesu szlifowania węgelnego kłowego

Wyniki zastosowania teorii zbiorów przybliżonych rozszerzonej o relację dominacji (DRSA) w pełni potwierdzają jej przydatność do budowy regułowego modelu procesu szlifowania węgelnego kłowego będącego podstawą wielokryterialnej oceny stanu tego procesu.

Pierwszym etapem zastosowania tej metodologii do klasyfikacji stanu procesu jest przygotowanie danych w postaci tablicy decyzyjnej. Podstawową kwestią tego etapu jest właściwe określenie klas decyzyjnych dla poszczególnych kryteriów oceny stanu procesu i przypisanie do nich adekwatnych przypadków realizacji procesu. Wykorzystano w tym celu bezpośrednie miary stanu CPS i jakości technologicznej przedmiotu. Na uwagę zasługuje wykorzystanie parametrów krzywej udziału materiałowego zarysu profilu CPS do określenia formy zużywania się CPS i stanu jej mikrogeometrii. Jednak w praktyce przemysłowej pozyskanie takich miar stanu CPS może być trudne. Wówczas można się posłużyć oceną ekspercką, ponieważ DRSA umożliwia takie postępowanie.

Chociaż DRSA toleruje dane niekompletne i niejednorodne, to interpolacja brakujących danych poprzez uzupełnienie ich wartościami średnimi z wartości dla przypadków sąsiednich poprawia wyniki klasyfikacji. Potwierdza to ogólną zasadę mówiącą, że jakość danych ma wpływ na wyniki klasyfikacji.

W wyniku przeprowadzonej za pomocą DRSA klasyfikacji wyselekcjonowano 5 kompletnych, minimalnych zbiorów reguł decyzyjnych, które pozwalają na dokładną reklasyfikację zbioru wszystkich przypadków realizacji procesu do oryginalnych klas określonych dla 5 różnych kryteriów oceny procesu i mogą służyć do klasyfikacji nowych przypadków. Weryfikacja efektywności otrzymanych reguł decyzyjnych odbyła się poprzez wyznaczanie wskaźników trafności klasyfikacji metodą walidacji leave-one-out.

Głównym kryterium selekcji zbiorów reguł decyzyjnych było ustalenie reduktów zbiorów atrybutów warunkowych, dla których uzyskiwano najwyższe wskaźniki trafności klasyfikacji. Uzyskane trafności klasyfikacji dla oceny formy zużywania się ściernicy (98,72%) i chropowatości (96,15%) można uznać za bardzo dobre. Trafność klasyfikacji stanu makrogeometrii CPS (89,74%) jest dobra, chociaż biorąc pod uwagę jej wysoką korelację z sygnałem drgań (rozdział 4.5) można byłoby oczekiwać wyższej wartości tego współczynnika. Przyczyny uzyskanej trafności klasyfikacji należy upatrywać w metodzie przydziału stanu makrogeometrii CPS do klas decyzyjnych dla poszczególnych przypadków.

Ocena wyników klasyfikacji stanu uszkodzeń cieplnych WW przedmiotu zależy od tego, czy w podzbiorze atrybutów warunkowych, na podstawie

którego dokonywana jest klasyfikacja znajduje się wskaźnik B_p . Uwzględnienie tego wskaźnika daje trafności klasyfikacji bliskie 100%. Wynika to z tego, że przydziału stanu uszkodzeń cieplnych WW dokonano na podstawie wartości tego współczynnika, a zatem nie należałoby go uwzględniać w tworzeniu modelu uszkodzeń cieplnych WW. Charakterystycznym przypadkiem jest klasyfikacja w oparciu o podzbiór atrybutów warunkowych składających się wyłącznie z Q'_w i q , dająca trafność równą 100%. Praktyczne znaczenie tego zbioru ogranicza się jednak do określonego rozłożenia wartości Q'_w i q stosowanych podczas badań doświadczalnych. Kolejnym podzbiorem atrybutów warunkowych nie zawierającym wskaźnika B_p , dla którego uzyskano wysoką trafność klasyfikacji (92,31%) jest podzbiór składający się z Q'_w , cV_w i cEA_{RMS_sr} . Jednakże brak wykrycia uszkodzeń cieplnych WW w trzech przypadkach budzi zastrzeżenia co do możliwości stosowania tego podzbioru w klasyfikacji nowych przypadków ze względu na istotność znaczenia uszkodzeń cieplnych w ocenie wyników szlifowania. Z rozważań tych wynika, że najpewniejsza i najprostsza klasyfikacja stanu uszkodzeń cieplnych WW przedmiotu po szlifowaniu to taka, która uwzględnia wartość wskaźnika B_p .

Uzyskana trafność klasyfikacji stanu mikrogeometrii CPS (80,77%) może nie satysfakcjonować. Jednak specyfika tej miary oceny procesu powoduje, że wartość trafności klasyfikacji nie powinna być jedynym stosowanym w tym względzie kryterium. Ważna jest również liczność przypadków sklasyfikowanych nieprawidłowo i w ogóle niesklasyfikowanych oraz właściwości kryterium decyzyjnego. W zastosowaniach praktycznych korzystniejszy jest brak przydziału stanu mikrogeometrii CPS do jednej z klas decyzyjnych niż przydział błędny, ponieważ niezwykle trudno jest precyzyjnie określić, kiedy stan mikrogeometrii CPS jest już niedopuszczalny. Biorąc pod uwagę te uwarunkowania, uzyskana klasyfikacja stanu mikrogeometrii CPS może być oceniona wysoko.

Podsumowanie procedury budowy regułowego modelu procesu szlifowania kłowego wglębnego z podaniem wartości podstawowych wskaźników klasyfikacji na kolejnych etapach tej procedury podaje tabela 5.13.

Skład podzbiorów atrybutów warunkowych najwyżej ocenionych zestawów reguł decyzyjnych dla poszczególnych kryteriów oceny procesu potwierdza wnioski z analizy teoretyczno-doświadczalnej przeprowadzonej w rozdziałach 3 i 4. Dla wszystkich 5 kryteriów, decyzja o stanie procesu powinna być podejmowana z uwzględnieniem wartości wielkości wejściowych, tj. parametrów nastawnych Q'_w i q oraz wartości aktualnego właściwego ubytku materiału szlifowanego V_w . A zatem wszystkie analizowane miary stanu procesu wykazały zależność od wielkości wejściowych. Potwierdzona została też największa zależność stanu makrogeometrii CPS od miar związanych z sygnałem drgań, stanu mikrogeometrii CPS od siły szlifowania, stanu uszkodzeń cieplnych od wskaźnika B_p i chropowatości od EA_{RMS} , drgań i wskaźnika B_p .

Tabela 5.13. Podsumowanie procedury budowy regułowego modelu procesu szlifowania kłowego wgłębnego

Wskaźnik	Atrybuty decyzyjne				
	Forma zużywania się CPS	Stan makro-geometrii CPS	Stan mikro-geometrii CPS	Stan uszkodzeń cieplnych WW	Chropowatość przedmiotu R_a
Liczność klas	S-54 T-24	1-46 2-32	1-62 2-16	1-58 2-12 3- 8	1-40 2-22 3-16
TK z uwzględnieniem wszystkich atrybutów war.	93.59%	76.92%	58.97%	98.72%	83.33%
Ekspertki podzbiór atrybutów warunkowych	C1, C2, C3, C4, C5, C6, C8, C9, C10, C15, C16, C17	C1, C2, C3, C11, C12, C13, C14, C17	C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10, C15, C16, C17	C1, C2, C3, C4, C8, C9, C10, C15, C16, C17	C1, C2, C3, C7, C8, C11, C12, C15, C16, C17
Liczba reduktów	324	23	643	197	66
TK dla EPA	91.03%	80.77%	62.82%	97.44%	75.64%
Wyniki końcowe					
Podzbiór atrybutów	C1, C2, C3, C8	C1, C2, C11, C12, C13, C17	C1, C2, C3, C6	C1, C3, C15	C1, C2, C3, C7
TK	98.72%	89.74%	80.77%	92.31%	96.15%
Liczba reguł	6	9	14	9	14

TK – trafność klasyfikacji, EPA – ekspertki podzbiór atrybutów.

Wiele szczegółowych miar analizowanych w rozdziale 4 nie znalazło się w żadnym z najkorzystniejszych zestawów reguł decyzyjnych. Wśród wykorzystywanych atrybutów warunkowych brak jest przede wszystkim miar oryginalnego sygnału EA. Oznacza to, że pomiar tego sygnału nie jest konieczny z punktu widzenia jakości nadzorowania. Ma to duże znaczenie praktyczne, ponieważ ze względu na wymaganą wysoką częstotliwość próbkowania rzędu 1-2 MHz, realizacja tego pomiaru i rejestracja sygnału wymagają specjalnego sprzętu i dużych zasobów pamięci komputera.

Z analizy składu podzbiorów atrybutów warunkowych najwyższej ocenionych zestawów reguł decyzyjnych wynika, że dla trafnej klasyfikacji stanów procesu szlifowania wgłębnego kłowego wystarczający jest pomiar składowych siły szlifowania, drgań i wartości skutecznej EA oraz rejestracja

bieżącej wartości właściwego ubytku materiału szlifowanego od ostatniego obciążania ściernicy.

Otrzymane w wyniku przeprowadzonej klasyfikacji reguły decyzyjne są gotową regułową bazą wiedzy o procesie szlifowania wgłębnego kłowego, która może być podstawą systemu eksperckiego tego procesu służącego do oceny i diagnostyki jego nowych realizacji, a także do ustalania wartości wybranych wielkości procesowych w celu osiągnięcia założonych wyników procesu. Zastosowanie DRSA zapewnia rozwiązanie jednego z najtrudniejszych problemów w budowie systemów eksperckich, jakim jest pozyskiwanie wiedzy od eksperta. W DRSA wiedza pozyskiwana jest z przykładów, którymi są kolejne realizacje procesu ocenione w wyniku przeprowadzenia odpowiednich pomiarów lub przez eksperta. Następnie metodą indukcji odkrywane są z tych przykładów reguły decyzyjne. A zatem do wiedzy dochodzi się metodami uczenia maszynowego jedynie z danych dostarczonych w postaci przykładów decyzji.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wprowadzenie automatycznego nadzorowania procesu szlifowania w głębnego kłowego wymaga rozwiązania wielu problemów z różnych dziedzin. Dotyczą one podstaw i techniki szlifowania oraz zastosowania odpowiednich układów pomiarowych, metod przetwarzania sygnałów, a także metod modelowania i klasyfikacji stanów lub wyników procesu. Z tego względu na początku pracy dokonano przeglądu stanu wiedzy w zakresie wszystkich tych zagadnień i ustalono istniejące między nimi współzależności.

Za punkt wyjścia do analizy teoretycznych podstaw nadzorowania procesu szlifowania przyjęto tzw. zalecany obszar parametrów nastawnych szlifowania. Obszar ten ograniczony jest możliwością powstania przypaleń i innych uszkodzeń cieplnych powierzchni obrabianej, utraty stabilności procesu spowodowanej efektem regeneracji drgań samowzbudnych oraz dopuszczalną chropowatością powierzchni. Dowolny punkt wewnątrz tego obszaru wyznacza parametry nastawne procesu spełniające wszystkie ograniczenia. Jednakże w czasie pojedynczego okresu trwałości ściernicy granice tego obszaru przemieszczają się. Wobec losowości tych zmian, najefektywniejszą metodą utrzymania procesu w stanie, w którym spełnione są wszystkie ograniczenia jest ciągłe monitorowanie stanu zużycia ściernicy oraz zjawisk ograniczających jego prawidłowy przebieg. W związku z tym przeanalizowano teoretyczno-doświadczalne podstawy nadzorowania następujących parametrów procesu i jakości przedmiotu:

- makro- i mikrozużycie CPS,
- drgania samowzbudne,
- uszkodzenia cieplne WW przedmiotu szlifowanego,
- chropowatość powierzchni szlifowanej.

W odniesieniu do makrozużycia CPS ustalono, że podstawowe znaczenie ma rozwój falistości na obwodzie ściernicy spowodowany rozwojem drgań samowzbudnych. Wobec tego podstawowym sygnałem pomiarowym służącym nadzorowaniu makrogeometrii CPS powinien być sygnał drgań lub sygnał wartości skutecznej EA. Przy nadzorowaniu mikrogeometrii CPS, podobnie jak przy nadzorowaniu chropowatości przedmiotu należy wziąć pod uwagę siłę szlifowania i sygnał EA. Natomiast do nadzorowania uszkodzeń cieplnych WW przedmiotu szlifowanego wystarczająca jest znajomość wartości wskaźnika B_p i wyznaczenie jego poziomu granicznego.

Stosowanie prostych, uzyskiwanych bezpośrednio z pomiaru (np. wartość średnia), miar wymienionych sygnałów pomiarowych parametrów procesu z reguły nie daje zadowalających rezultatów oceny stanu procesu. Istnieje zatem potrzeba zastosowania zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów.

Przeprowadzone badania doświadczalne pozwoliły dokonać oceny przydatności wybranych wielkości procesowych i metod przetwarzania sygnałów do nadzorowania procesu.

Wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych wykorzystano do budowy klasyfikatora stanu procesu w oparciu o zastosowanie teorii zbiorów przybliżonych rozszerzonej o relację dominacji (DRSA).

DRSA jest narzędziem matematycznym stosowanym do rozwiązywania złożonych problemów decyzyjnych na podstawie danych ilościowych uporządkowanych według preferencji, typowych dla miar opisujących stan i wyniki procesu szlifowania. Poprzez indukcję reguł decyzyjnych z danych o procesie tworzony jest model zależności pomiędzy obserwowalnymi miarami sygnałów pomiarowych oraz wielkościami wejściowymi procesu a wielkościami wyjściowymi. Reguły mają postać wyrażeń logicznych, które w sposób jawny reprezentują wiedzę o procesie i posiadają zdolność objaśniania proponowanych decyzji. A zatem mogą być wykorzystane do nadzorowania procesu.

Podstawą przeprowadzenia indukcji reguł decyzyjnych jest przygotowanie danych w postaci tablicy decyzyjnej. Zasadnicze znaczenie w przygotowaniu tablicy decyzyjnej ma określenie klas decyzyjnych dla poszczególnych kryteriów oceny stanu procesu i przypisanie do nich adekwatnych przypadków realizacji procesu. Wykorzystano w tym celu bezpośrednio miary stanu CPS i jakości technologicznej przedmiotu. DRSA umożliwia również zastosowanie w tej procedurze ocen eksperckich. Mimo, że DRSA toleruje dane niekompletne i niejednorodne, to jednak jakość danych ma wpływ na wyniki klasyfikacji.

W wyniku przeprowadzonej za pomocą DRSA klasyfikacji wyselekcjonowano 5 kompletnych, minimalnych zbiorów reguł decyzyjnych, które pozwalają na dokładną reklasyfikację zbioru wszystkich przypadków realizacji procesu do oryginalnych klas określonych dla formy zużywania się ściernicy, stanu makro- i mikrogeometrii CPC, stanu uszkodzeń cieplnych WW przedmiotu szlifowanego i chropowatości powierzchni szlifowanej. Otrzymane reguły decyzyjne zostały zweryfikowane poprzez wyznaczenie dla każdego wygenerowanego zbioru wskaźnika trafności klasyfikacji. Zastosowano w tym celu odmianę metody walidacji krzyżowej zwaną leave-one-out. Zweryfikowane zbiory reguł decyzyjnych mogą następnie służyć do klasyfikacji nowych przypadków procesu szlifowania.

DRSA dokonuje selekcji istotnych miar oceny stanu i wyników poprzez wyznaczanie reduktów zbiorów atrybutów warunkowych, dla których uzyskano najwyższe wskaźniki trafności klasyfikacji. Dzięki temu ustalono, że dla trafnej klasyfikacji stanów procesu szlifowania wglębnego kłowego wystarczający jest pomiar składowej normalnej i stycznej siły szlifowania, drgań i wartości skutecznej EA oraz rejestracja bieżącej wartości właściwego ubytku materiału szlifowanego od ostatniego obciążania ściernicy. Zarówno w doborze najefektywniejszych podzbiorów atrybutów decyzyjnych, jak i w interpretacji jakości otrzymanych reguł decyzyjnych nie należy kierować się wyłącznie wynikami generowanymi automatycznie przez algorytm systemu. Ostateczna weryfikacja powinna podlegać ocenie eksperta. Pozwala to na uwzględnienie wiedzy o uporządkowaniu dziedzin atrybutów według preferencji oraz wiedzy

o korelacji semantycznej pomiędzy atrybutami warunkowymi a decyzyjnymi. Udział eksperta w procesie klasyfikacji może jednak stanowić przeszkodę w przypadku chęci wykorzystania DRSA w budowie w pełni zautomatyzowanego systemu klasyfikacji. Wskazuje to kierunek dalszych badań nad wykorzystaniem tej metody. Na przykład zastosowanie algorytmów genetycznych do wyznaczania optymalnych z punktu widzenia jakości klasyfikacji reduktów zbiorów atrybutów warunkowych może okazać się efektywną metodą rozwiązywania tego problemu.

Otrzymane w wyniku przeprowadzonej klasyfikacji regułowe modele procesu umożliwiają dokonywanie skutecznej oceny jego stanu na podstawie wielu miar uzyskiwanych z różnych sygnałów pomiarowych. Stanowią one gotową regułową bazę wiedzy o procesie szlifowania węgelnego kłowego, która może być podstawą systemu eksperckiego tego procesu służącego do oceny i diagnostyki jego nowych realizacji, a także do ustalania wartości wybranych wielkości procesowych w celu osiągnięcia założonych wyników procesu.

Zastosowanie DRSA zapewnia rozwiązanie jednego z najtrudniejszych problemów w budowie systemów eksperckich, jakim jest pozyskiwanie wiedzy od eksperta. W DRSA do wiedzy dochodzi się metodami uczenia maszynowego z danych dostarczonych w postaci przykładów, którymi są kolejne realizacje procesu lub przykłady decyzji eksperta. Następnie metodą indukcji odkrywane są z tych przykładów reguły decyzyjne. Systemy charakteryzujące się taką właściwością mogą być określone jako inteligentne nie tylko ze względu na stosowane procedury, ale ze względu na naturę swego działania.

Konkludując można stwierdzić, że praca formułuje praktyczne podstawy automatycznego inteligentnego nadzorowania procesu szlifowania węgelnego kłowego. Dalsze prace powinny być skierowane na doskonalenie metod pomiarowych i poszukiwanie nowych algorytmów przetwarzania sygnałów pozwalających na ustalenie bardziej wiarygodnych symptomów stanu procesu. Ponadto konieczne jest ciągle rozszerzanie doświadczalnej bazy danych o procesie o nowe materiały szlifowane, stosowane ściernice i parametry szlifowania, co umożliwi budowę bardziej uniwersalnych i możliwych do przemysłowego wykorzystania klasyfikatorów stanu procesu.

Przedstawione podsumowanie i najważniejsze wnioski płynące z pracy wraz ze szczegółowymi wnioskami zamieszczonymi na zakończenie rozdziałów 3, 4 i 5 upoważniają do stwierdzenia, że założone cele pracy zostały osiągnięte i postawione tezy udowodnione.

BIBLIOGRAFIA

- [ABBJ-02] ACHICHEA S., BALAZINSKI M., BARON L., JEMIELNIAK, K.: Tool Wear Monitoring Using Genetically-generated, Fuzzy Knowledge Bases. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 15 (2002), s. 303-314.
- [Adam-95] ADAMCZYK Z.: AI in Automatic Supervision and Control of Machining Process. *Proceedings of the 4th International Conference on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing AC'98*, Warszawa, 28-29.08.1995, s. 99-106.
- [AJKS-96] ADAMCZYK Z., JEMIELNIAK K., KOSMOL J., SOKOŁOWSKI A.: *Monitorowanie ostrza skrawającego – metody konwencjonalne i sieci neuronowe*. WNT, Warszawa 1996.
- [AlWe-04] ALTINAS Y., WECK M.: Chatter Stability of Metal Cutting and Grinding. *Annals of the CIRP*, Vol. 53/2/2004.
- [BAGH-06] BRINKSMEIER E., AURICH J.C., GOVEKAR E., HEINZEL C., HOFFMEISTER H.-W., KLOCKE F., PETERS J., RENTSCH R., STEPHENSON D.J., UHLMANN E., WEINERT K., WITTMANN M.: Advances in Modelling and Simulation of Grinding Processes. *Annals of the CIRP*, Vol. 55/2/2006.
- [BaRW-92] BÄHRE D., ROSENBERGER U., WARNECKE G.: Monitoring of cutting processes by vibration analysis: exemplary applications in grinding and turning processes. *Proceedings of 1992 ASME Winter Annual Meeting, Sensors and signal processing for manufacturing*. Anaheim, California Nov. 1992, s. 65-80.
- [BDIK-95] BYRNE G., DORNFELD D., INASAKI I., KETTELER G., TETI R.: Tool Condition Monitoring (TCM) – The Status of Research and Industrial Application. *Annals of the CIRP*, Vol. 44/2/1995, s. 541-567.
- [Biał-00] BIAŁASIEWICZ J.T.: *Falki i aproksymacje*. WNT, Warszawa 2000.
- [BłGS-07] BŁASZCZYŃSKI J., GRECO S., SŁOWIŃSKI R.: Multi-criteria classification – A new scheme for application of dominance-based decision rules. *European Journal of Operational Research*, 181 (2007), s. 1030-1044.
- [BłGS-11] BŁASZCZYŃSKI J., GRECO S., SŁOWIŃSKI R.: Inductive discovery of laws using monotonic rules. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, (w druku).
- [BłSS-11] BŁASZCZYŃSKI J., SŁOWIŃSKI R., SZELAĞ M.: Sequential covering rule induction algorithm for variable consistency rough set approaches. *Information Sciences*, 2011/181, s. 987-1002.
- [Bork-90] BORKOWSKI J.: *Zużycie i trwałość ściernic*. PWN, Warszawa 1990.
- [BrHM-05] BRINKSMEIER E., HEINZEL C., MEYER L.: Development and Application of a Wheel Based Process Monitoring System in Grinding. *Annals of the CIRP*, Vol. 54/1/2005, s. 301-304.
- [BrWe-92] BRINKSMEIER E., WERNER F.: Monitoring of Grinding Wheel Wear. *Annals of the CIRP*, Vol. 41/1/1992, s. 373-376.

- [BTCH-98] BRINKSMEIER E., TÖNSHOFF H.K., CZENKUSCH C., HEINZEL C.: Modelling and optimization of grinding processes. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1998/9, s. 303-314.
- [BTIP-93] BRINKSMEIER E., TÖNSHOFF H.K., INASAKI I., PEDDINGHAUS J.: Basic Parameters in Grinding – Report on a Cooperative Work in STC “G”. *Annals of the CIRP*, Vol. 42/2/1993, s. 795-799.
- [Cemp-89] CEMPEL C.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. WNT, Warszawa 1989.
- [ChDo-89] CHRYSSOLOURIS G., DOMROESE M.: An Experimental Study of Strategies for Integrating Sensor Information in Machining. *Annals of the CIRP*, Vol. 38/1/1989.
- [ChDZ-90] CHRYSSOLOURIS G., DOMROESE M., ZSOLDOS L.: A Decision-Making Strategy for Machining Control. *Annals of the CIRP*, Vol. 39/1/1990.
- [ChKu-98] CHEN Y.T., KUMARA S.R.: Fuzzy Logic and Neural Networks for Design of Process Parameters: A Grinding Process Example. *Int. Journal Production Research*, Vol. 36/2/1998, s. 395-415.
- [CRLM-96] CHEN X., ROWE W.B., LI Y., MILLS B.: Grinding vibration detection using a neural network. *Proceedings of the I MECH E, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 1996, Vol. 210, s. 349-352.
- [DBVC-09] DORNFELD D.A., BLOMQUIST B., VIJAYARAGHAVAN A., CONLEY M., HUET L., SOBEL W.: Addressing Process Planning and Verification Issues with MTConnect. *Transactions of MAMRI/SME*, Vol. 37, 2009, s. 557-564.
- [DęUr-02] DĘBKOWSKI R., URBANIAK M.: Doradczy system do projektowania operacji szlifierskiej. *Prace Naukowe Inst. Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, Seria: Konferencje – XXV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej*, Wrocław 2002, s. 119-124.
- [DoBl-90] DORNFELD D.A., BLUM T.: Grinding Process Feedback using Acoustic Emission. *Proc. 4th Int. Grinding Conf.*, Dearborn, Michigan, Oct. 1990.
- [DoCa-84] DORNFELD D.A., CAI H.G.: An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission. *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 106/1984, s. 28-33.
- [DoCh-93] DORNFELD D.A., CHANG Y.P.: Chatter and Surface Pattern Detection for Grinding Process using a Fluid Coupled Acoustic Emission Sensor. *Proc. Int. Conf. Machining of Advanced Materials, NIST*, July 1993, s. 159-167.
- [DoKa-80] DORNFELD D.A., KANNATEY-ASIBU E.: Acoustic emission during orthogonal metal cutting. *International Journal of Mechanical Sciences* Vol. 22 (1980), s. 285-296.
- [DoPa-85] DORNFELD D.A., PAN CH.: Determination of Chip Forming States Using a Linear Discriminant Function Technique with Acoustic Emission. *Proceedings of the 13th North American Manufacturing Research Conference*, 1985.
- [Dorn-90a] DORNFELD D.A.: Neural Network Sensor Fusion for Tool Condition Monitoring. *Annals of the CIRP*, Vol. 39/1/1990, s. 101-105.
- [Dorn-90b] DORNFELD D.A.: Unconventional sensors and signal conditioning for automatic supervision. *Proceedings of the 3th Int. Conf. on Automatic Supervision, Monitoring and Adaptive Control in Manufacturing AC’90*, Rydzyna, 1990.

- [EmKa-87] EMEL E., KANNATEY-ASIBU E.: Tool failure monitoring in turning by pattern recognition analysis of AE signals. Proceedings of 1987 ASME Winter Annual Meeting, Sensors for manufacturing. Chicago, December 1987, s. 39-57.
- [Fili-04] FILIPCZYŃSKI S.: Nadzorowanie stanu ściernicy w inteligentnym systemie szlifowania kłowego wałków. Praca dyplomowa pod kier. P. Leżańskiego, Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Łódź 2004.
- [GBGK-02] GOVEKAR E., BAUS A., GRADISEK J., KLOCKE F., GRABEC I.: A New Method for Chatter Detection in Grinding. Annals of the CIRP, Vol. 51/1/2002, s. 267-270.
- [GrKu-94] GRABEC I., KULJANIĆ E.: Characterization of Manufacturing Processes Based upon Acoustic Emission Analysis by Neural Networks. Annals of the CIRP Vol. 43/1/1994, s. 77-80.
- [GrMS-01] GRECO S., MATARAZZO B., SŁOWIŃSKI R.: Rough sets theory for multicriteria decision analysis. European Journal of Operational Research, Nr 129 (2001), s. 1-47.
- [Grzy-97] GRZYMAŁA-BUSSE J.W.: A new version of the rule induction system LERS. Fundamenta Informaticae, Vol. 31, s. 27-39.
- [Hahn-84] HAHN R.S.: Application of Force-Adaptive Grinding. SME Technical Paper MR 84-530.
- [Hamr-90] HAMROL A.: Teoretyczna i doświadczalna analiza możliwości diagnostyki i nadzorowania procesu szlifowania wewnętrznego. Politechnika Poznańska, Rozprawy Nr 245, Poznań 1990.
- [HFTL-08] HUANG C.C., FAN Y.N., TSENG T.L., LEE C.H., CHUANG H.F.: A Hybrid Mining Approach to Quality Assurance of Manufacturing Process. IEEE Inter. Conf. on Fuzzy Systems (FUZZ 2008), s. 818-825.
- [HMYU-04] HOSOKAWA A., MASHIMO K., YAMADA K., UEDA T.: Evaluation of grinding wheel surface by means of grinding sound discrimination. JSME International Journal, Series C, 47 (1) (2004), s. 52-58.
- [HoHu-04] HOU T.H., HUANG C.C.: Application of fuzzy logic and variable precision rough set approach in a remote monitoring manufacturing process for diagnosis rule induction. Journal of Intelligent Manufacturing, 2004/15, s. 395-408.
- [HoLL-03] HOU T.H., LIU W.L., LIN L.: Intelligent remote monitoring and diagnosis of manufacturing processes Using an integrated approach of neural networks and rough sets. Journal of Intelligent Manufacturing, 2003/14, s. 239-253.
- [HoPr-03] HOHWIELER E., PRUSCHEK P.: Technology "Trend Report" – State-of-the-art: Reliability, Process Monitoring and Control. MANTYS – Thematic Network on Manufacturing Technologies, <http://www.mantys.org>, 28.05.2003.
- [HuLP-05] HUANG C.L., LI T.S., PENG T.K.: A hybrid approach of rough set theory and genetic algorithm for fault diagnosis. Int. J. of Advanced Manufacturing Technology, (2005) 27, s. 119-127.
- [Inas-77] INASAKI I.: Regenerative Chatter in Grinding. Proceedings of the 18-th Int. Machine Tool Design and Research Conference, 1977, s. 423-429.
- [Inas-85] INASAKI I.: Monitoring of Dressing and Grinding Processes with Acoustic Emission Signals. Annals of the CIRP, Vol. 34/1/1985, s. 277-280.
- [Inas-91] INASAKI I.: Monitoring and Optimization of Internal Grinding Process. Annals of the CIRP, Vol. 40/1/1991, s. 359-362.

- [Inas-95] INASAKI I.: Intelligent Monitoring and Supervision in Grinding. Proceedings of the 4th Int. Conf. on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing AC'95, Warszawa 1995, s. 257-268.
- [Inas-98a] INASAKI I.: Sensor Fusion for Monitoring and Controlling Grinding Processes. Proc. 5th Int. Conf. on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing AC'98, Warszawa 1998, s. 23-32.
- [Inas-98b] INASAKI I.: Application of Acoustic Emission Sensor for Monitoring Machining Processes. Ultrasonics, 1998, s. 273-281.
- [InKL-01] INASAKI I., KARPUSZEWSKI B., LEE H.-S.: Grinding Chatter – Origin and Suppression. Annals of the CIRP, Vol. 50/2/2001.
- [IwMo-77] IWATA K., MORIWAKI T.: An Application of Acoustic Emission Measurements to In-Process Sensing of Tool Wear. Annals of the CIRP, Vol. 26/1/1977, s. 21-26.
- [JBMA-11] JAWAHIR I.S., BRINKSMEIER E., M'SAOUBI R., ASPINWALL D.K., OUTEIRO J.C., MEYER D., UMBRELLO D., JAYAL A.D.: Surface integrity in material removal processes: Recent advances. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 60 (2011), s. 603-626.
- [JeKo-96] JEMIELNIAK K., KOSMOL J.: Diagnostyka narzędzia i procesu skrawania – stan aktualny i kierunki rozwoju. Mechanik, 1996, Nr 10.
- [Jemi-01] JEMIELNIAK K.: Some Aspects of Acoustic Emission Signal Pre-processing. Journal of Materials Processing Technology, 109 (2001), s. 242-247.
- [Jemi-02] JEMIELNIAK K.: Automatyczna diagnostyka stanu narzędzia i procesu skrawania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002.
- [Jemi-11] JEMIELNIAK K.: Przetwarzanie sygnałów w diagnostyce stanu narzędzia i procesu skrawania. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, Vol. 31, nr 2 (2011), s. 37-49.
- [Jemi-92] JEMIELNIAK K.: Detection of Cutting Edge Breakage in Turning. Annals of the CIRP, Vol. 41/1/1992, s. 97-100.
- [Kaca-88] KACALAK W.: Wprowadzenie do modelowania procesów szlifowania z uwzględnieniem probabilistycznego charakteru topografii powierzchni oraz zużycia ściernicy. Materiały XI Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Łódź 1988, s. 7-16.
- [KaDo-81] KANNATEY-ASIBU E., DORNFELD D.A.: Quantitative Relationship for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 103/Aug. 1981, s. 330-339.
- [KaDo-82] KANNATEY-ASIBU E., DORNFELD D.A.: A Study of Tool Wear Using Statistical Analysis of Metal-Cutting Acoustic Emission. Wear, 76 (1982), s. 247-261.
- [KaLK-03] Kacalak W., LIPIŃSKI D., KRZYŻYŃSKI T.: On the Hybrid System of Quality Supervising in the Automated Grinding Process. Materiały Drugiej Międzynarodowej Konferencji CAMT "Modern Trends in Manufacturing", Wrocław 2003, s. 167-174.
- [KaWi-00] KARPUSZEWSKI B., WEHMEIER M., INASAKI I.: Grinding Monitoring System Based on Power and Acoustic Emission Sensors. Annals of the CIRP, Vol. 49/1/2000, s. 235-240.
- [KKKC-02] KORBICZ J., KOŚCIELNY J.M., KOWALCZUK Z., CHOLEWA W. (RED.): Diagnostyka procesów – Modele, Metody sztucznej inteligencji, Zastosowania. WNT, Warszawa 2002.

- [Kloc-09] KLOCKE F.: Manufacturing Processes 2, Grinding, Honing, Lapping. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009.
- [KoBS-89] KOVACH J.A., BEN-DAVID A., STERLING L.: An expert grinding advisor for the surface grinding of superalloys. Proceedings of 1989 ASME Winter Annual Meeting: Grinding Fundamentals and Applications, California, Dec. 1989, s. 349-356.
- [KoĆw-05] KORONACKI J., ĆWIK J.: Statystyczne systemy uczące się. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.
- [KoJo-97] KOHAVI, R. , JOHN G.H.: Wrappers for feature subset selection. Artificial Intelligence, 97 (1997), s. 273-324.
- [Koza-05] KOZAK J.: Technika mikrosystemów i wybrane metody mikrotechnologii. W „Obróbka ścierna w technikach wytwarzania” pod red. L. Dąbrowskiego, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005, s. 11-23.
- [Kozi-96] KOZIARSKI A.: Czynna powierzchnia ściernicy. Metody badań makro- i mikrogeometrii. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Seria Monografie, Łódź 1996.
- [KrLa-05] KRUSZYŃSKI B. W., LAJMERT P.: An Intelligent Supervision System for Cylindrical Traverse Grinding. Annals of the CIRP, Vol. 54/1/2005, s. 305-308.
- [KrSt-04] KRAWIEC K., STEFANOWSKI J.: Uczenie maszynowe i sieci neuronowe. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004.
- [Krus-01] KRUSZYŃSKI: Surface integrity in grinding. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Seria Monografie, Łódź 2001.
- [KrW6-01] KRUSZYŃSKI B.W., WÓJCIK R.: Residual stress in grinding. Journal of Materials Processing Technology Nr 109 (2001), s. 254-257.
- [Kwaś-93] KWAŚNIEWSKI J.: Wprowadzenie do inteligentnych przetworników pomiarowych. WNT, Warszawa 1993.
- [KwHa-04] KWAK, J.-S., HA, M.-K.: Detection of Dressing Time Using the Grinding Forcesignal Based on the Discrete Wavelet Decomposition. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, s. 87-92.
- [KwRa-91] KWAPISZ L., RAFAŁOWICZ J.: Szlifierki: obrabiarki ścierne. WNT, Warszawa 1991.
- [Lajm-03] LAJMERT P.: Wykorzystanie metod sztucznej inteligencji do sterowania i optymalizacji procesu szlifowania wzdłużnego wałków. Praca doktorska, Politechnika Łódzka, 2003.
- [LaLe-12] LAJMERT P., LEŻAŃSKI P.: Monitoring of the cylindrical plunge grinding process. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji. Vol. 32, nr 3, Poznań 2012 (w druku).
- [LeBa-08] LEŻAŃSKI P., BARTOSIK D.: Baza wiedzy o procesie szlifowania kłowego wałków. [w:] „Wybrane problemy obróbki ścierniej” pod red. C. Niżankowskiego, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Bochnia 2008, s. 215-224.
- [LeLa-00] LEŻAŃSKI P., LAJMERT P.: An Intelligent Cylindrical Grinding Machine. Materiały XI Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems „Design and Optimization of Intelligent Machine Tools”, ed. J. Jędrzejewski, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000, s. 117-125.
- [LeLa-01] LEŻAŃSKI P., LAJMERT P.: An Intelligent cylindrical grinding system. Computer Integrated Manufacturing – Proceedings of the International Conference CIM 2001, Zakopane, marzec 2001, WNT, Warszawa 2001, s. 293-302.

- [LeLa-03] LEŻAŃSKI P., LAJMERT P.: An Intelligent System for Grinding Process Control and Optimization. Materiały Drugiej Międzynarodowej Konferencji CAMT "Modern Trends in Manufacturing", Wrocław 2003, s. 231-238.
- [LeLa-04] LEŻAŃSKI P., LAJMERT P.: Zastosowanie parametrów krzywej udziału materiałowego do oceny zużycia ściernicy. Zeszyty Naukowe Wydz. Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej Nr 36, XXVII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Sarbinowo, wrzesień 2004, s. 275-282.
- [LeLa-98] LEŻAŃSKI P., LAJMERT P.: Diagnostics of Cylindrical Grinding Process with Acoustic Emission Signals. Materiały IX Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems „Manufacturing Simulation for Industrial Use”, ed. J. Jędrzejewski, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998, s. 251-258.
- [LeLa-99] LEŻAŃSKI P., LAJMERT P.: Przydatność sygnału emisji akustycznej w diagnostyce procesu szlifowania wgłębnego. Inżynieria Maszyn Nr 4/98, Wrocław 1999.
- [LeRa-92] LEŻAŃSKI P., RAFAŁOWICZ J.: Diagnostyka procesu szlifowania kłowego wałków. Postępy technologii maszyn i urządzeń 2/1992.
- [LeRa-93] LEŻAŃSKI P., RAFAŁOWICZ J.: An Intelligent Monitoring System for Cylindrical Grinding. Annals of the CIRP, Vol. 42/1/1993, s. 393-396.
- [Lewa-02] LEWANDOWSKI D.: Ciśnieniowy pomiar obciążeń. Mat. Konf. Napędy i Sterowania Hydrauliczne, Wrocław 2002, s. 144-150.
- [Leża-01a] Leżański P.: An Intelligent System for Grinding Wheel Condition Monitoring. Journal of Materials Processing Technology, 109 (2001), s. 258-263.
- [Leża-01b] LEŻAŃSKI P.: Grinding Wheel Condition Monitoring in Cylindrical Grinding Process. Annals of DAAAM for 2001 and Proceedings of the 12th International DAAAM Symposium Intelligent Manufacturing and Automation: Focus on Precision Engineering”, Jena, October 2001, ed. B. Katalinic, Published by DAAAM International Vienna, Vienna 2001, s. 271-272.
- [Leża-01c] LEŻAŃSKI P.: Diagnostyka stanu ściernicy w szlifowaniu wzdłużnym wałków. Aktualne problemy obróbki ściernej – Materiały XXIV Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Łopuszna, wrzesień 2001, s. 381-388.
- [Leża-01d] LEŻAŃSKI P.: Model zużycia ściernicy dla potrzeb diagnostyki jej stanu przy szlifowaniu wzdłużnym wałków. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „Manufacturing M’01 – Współczesne Problemy Wytwarzania“, Zakład Graficzny Politechniki Poznańskiej, Poznań, listopad 2001, s. 413-420.
- [Leża-03] LEŻAŃSKI P.: Diagnostyka procesu w inteligentnym systemie szlifowania kłowego. Materiały IV Wrocławskiego Sympozjum „Automatyzacja Produkcji” AP 2003, Wrocław 2003, Tom I, s. 363-370.
- [Leża-08] LEŻAŃSKI P.: Monitorowanie stanu ściernicy z zastosowaniem analizy falkowej. [w:] Wybrane problemy obróbki ściernej, pod red. C. Niżankowskiego, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Bochnia 2008, s. 225-234.
- [Leża-10a] LEŻAŃSKI P.: Wykorzystanie pomiaru drgań do nadzorowania makrogeometrii CPS. [w:] Podstawy i technika obróbki ściernej, pod red. A. Gołąbczaka i B. Kruszyńskiego (Materiały XXXIII NSOŚ), Łódź 2010, s. 107-116.
- [Leża-10b] LEŻAŃSKI P.: Ocena przydatności wybranych wielkości procesowych do nadzorowania stanu procesu szlifowania wgłębnego, Inżynieria Maszyn,

- Zeszyt Nr 15/4/2010 „Zwiększanie dokładności Wytwarzania – Obrabiarki i Procesy Obróbkowe” pod red. B. Kruszyńskiego, s. 95-112.
- [Leża-93] LEŻAŃSKI P.: Monitoring of Grinding Processes with Acoustic Emission Signal. Materiały III Naukowej Szkoły Nadzorowania i Diagnostyki Systemów Obróbkowych, Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, Zeszyt Nr 51/19, Wrocław 1993, s. 22-31.
- [Leża-96a] LEŻAŃSKI P.: An Expert System for Cylindrical Grinding Diagnostics. Materiały VII Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems „Thermal Behaviour, Intelligent Diagnostics and Supervising of Machining Systems”, ed. J. Jędrzejewski, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1996, s. 281-287.
- [Leża-96b] LEŻAŃSKI P.: Inteligentny nadzór procesu szlifowania. Materiały XIX Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Łódź, 10-13 września 1996, s. 351-356.
- [Leża-98] LEŻAŃSKI P.: An Intelligent System for Grinding Wheel Condition Monitoring. Proceedings of the International Conference on Advances in Production Engineering, Warszawa, 01-03.06.1998, s. II/128-135.
- [LHQB-06] LIAO T.W., HUA G., QU J., BLAU P.J.: Grinding wheel condition monitoring with hidden Markov model-based clustering methods. Machining Science and Technology, 10 (2006), s. 511-538.
- [Liao-10] LIAO T.W.: Feature extraction and selection from acoustic signals with an application in grinding wheel condition monitoring. Engineering Application of Artificial Intelligence, 23 (2010), s. 74-84.
- [LiCG-05] LIU Q., CHEN X., GINDY N.: Fuzzy pattern recognition of AE signals for grinding burn. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45 (2005), s. 811-818.
- [LiCh-94] LIAO T.W., CHEN L.J.: A neural network approach for grinding processes: modeling and optimization. Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 34/7/1994, s. 919-937.
- [LiCh-98] LIAO T.W., CHEN L.J.: Manufacturing Process Modeling and Optimization Based on Multi-Layer Perceptron Network. Transaction of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering Vol. 120/Feb. 1998, s. 109-119.
- [LiCQ-97] LIU H.X., CHEN T., Qu L.S.: Predicting Grinding Burn Using Artificial Neural Networks. Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 8/3/1997, s. 235-237.
- [LiDo-89] LIANG S.Y., DORNFELD D.A.: Tool Wear Detection Using Time Series Analysis of Acoustic Emission. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 111/Aug. 1989, s. 199-205.
- [LiJi-80] LICHUN L., JIZAI F.: A Study of Grinding Force Mathematical Model. Annals of the CIRP, Vol. 29/1/1980, s. 245-249.
- [LiKa-06] LIPIŃSKI D., KACALAK W.: Ocena wpływu wybranych zmiennych procesu szlifowania na dokładność obróbki z wykorzystaniem wnioskowania rozmytego. Materiały XXIX Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Gdańsk-Jurata, wrzesień 2006, s. 152-156.
- [LiKY-10] LI-MING X., KAI-ZHOU X., YUN-DONG C.: Identification of grinding wheel wear signature by a wavelet packet decomposition method, J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.), 2010, 15(3), s. 323-328.
- [LiLe-91] LIN C.T., LEE C.S.: Neural-Network-Based Fuzzy Logic Control and Decision System. IEEE Transactions on Computers, Vol. 40, No. 12, December 1991, s. 1320-1336.

- [LiMR-97] LI Y., MILLS B., ROWE W.B.: An intelligent system for selection of grinding wheels. In: Proc. of Instn. Mech. Engrs, Journal of Engineering Manufacture, 1997, Vol. 211, s. 635-641.
- [LiRM-99] LI Y., ROWE W.B., MILLS B., Study and selection of grinding conditions, Part1: Grinding conditions and selection strategy. In: Proc. of Instn. Mech. Engrs, Journal of Engineering Manufacture, 1999, Vol. 213, s. 119-129.
- [LiYu-98] LI X., YUAN Z.: Tool wear monitoring with wavelet packet transform – fuzzy clustering method. Wear 219 (1998), s. 145-154.
- [LRCM-99] LI Y., ROWE W.B., CHEN X., MILLS B., Study and selection of grinding conditions, Part 2: A hybrid intelligent system for selection of grinding conditions. In: Proc. of Instn. Mech. Engrs, Journal of Engineering Manufacture, 1999, Vol. 213, s. 131-142.
- [LTQB-07] LIAO T.W., TING C.-F., QU J., BLAU P.J., A wavelet-based methodology for grinding wheel condition monitoring, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47 (2007), s. 580-592.
- [LTQB-07] LIAO, W.T., TING, C.-F., QU, J., BLAU, P.J.: A Wavelet-based Methodology for Grinding Wheel Condition Monitoring. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47 (2007), s. 580-592.
- [LTQB-08] LIAO W.T., TANG F., QU J., BLAU P.J.: Grinding wheel condition monitoring with boosted minimum distance classifiers. Mechanical Systems and Signal Processing, 22 (2008), s. 217-232.
- [MaAK-03] MAKSOUD T.M.A., ATIA M.R., KOURAM.M.: Applications of artificial intelligence to grinding operations via neural networks. Machining Science and Technology, Vol. 7/3/2003, s. 361-387.
- [MaCe-04] MANNAR K., CEGLAREK D.: Continuous Failure Diagnosis for Assembly Systems using Rough Set Approach. Annals of the CIRP Vol. 53/1/2004, s. 39-42.
- [MaCo-71] MALKIN S., COOK N.H.: The wear of grinding wheels. Transaction of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 93, No. 4/1971.
- [MaGu-08] MALKIN, S.; GUO, C.: Grinding Technology – Theory and Applications of machining with Abrasives. Industrial Press, New York, 2008.
- [Malk-81] MALKIN S.: Grinding cycle optimization. Annals of the CIRP, Vol. 30/1/1981, s. 223-226.
- [MaSa-80] MATSUSHIMA K., SATA T.: Development of Intelligent Machine Tools. Journal of the Faculty of Engineering. The University of Tokyo. Vol. XXXV, No. 3 (1980), s. 126-136.
- [MaSP-75] MARIS M., SNOEYS R., PETERS J.: Analysis of plunge grinding operations, Annals of the CIRP, Vol. 24/2/1975, s. 225-230.
- [MCNA-06] MANNAR K., CEGLAREK D., NIU F., ABIFARAJ B.: Fault Region Localization (FRL): Product and Process Improvement Based on Field Performance and Distributed Manufacturing Measurements. IEEE Trans. Aut. Sci. Eng., 2006/3, s. 423-439.
- [MGFG-01] MAMALIS A.G., GRABCZENKO A.I., FEDOROVICH V.A., GRINKO S.A., PAULMIER D., HORVATH M.: Development of an expert system of diamond grinding of superhard polycrystalline materials considering grinding wheel. Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 21/12/2001, s. 929-934.

- [MMBW-96] MONOSTORI L., MARKUS A., VAN BRUSSEL H., WESTKAMPER E.: Machine Learning Approaches to Manufacturing, Annals of the CIRP, Vol. 45/2/1996, s. 675-712.
- [MoBa-92] MONOSTORI L., BARSCHDORFF D.: Artificial neural networks in intelligent manufacturing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 9/1992, No. 6, s. 421-437.
- [Mono-86] MONOSTORI L.: Learning procedures in machine tool monitoring. Computers in Industry, Vol. 7/1986, s. 53-64.
- [Mono-93] MONOSTORI L.: A step towards intelligent manufacturing: Modeling and monitoring of manufacturing processes through artificial neural networks. Annals of the CIRP, Vol. 42/1/1993, s. 485-488.
- [Mono-95] MONOSTORI L.: Hybrid AI Approaches to Supervision and Control of Manufacturing Processes. Proceedings of the 4th International Conference on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing AC'95, Warszawa, 28-29.08.1995, s. 37-47.
- [Nowi-91] NOWICKI B.: Struktura geometryczna – chropowatość i falistość powierzchni, WNT, Warszawa 1991.
- [OcBu-00] OCZOŚ K., BUREK J.: Sterowanie chropowatością i falistością powierzchni w procesie szlifowania. Międzynarodowa Konferencja naukowa – Obróbka Materiałów, Kraków 2000, s. 223-230.
- [OcPo-86] OCZOŚ K., PORZYCKI J.: Szlifowanie – Podstawy i Technika, WNT, Warszawa, 1986.
- [OIdo-01] OLIVEIRA J.F., DORNFELD D.A.: Application of AE Contact Sensing in Reliable Grinding Monitoring. Annals of the CIRP, Vol. 50/1/2001, pp. 217-220.
- [OIDW-94] OLIVEIRA J.F., DORNFELD D.A., WINTER B.: Dimensional Characterization of Grinding Wheel Surface through Acoustic Emission. Annals of the CIRP, Vol. 43/1/1994, s. 291-294.
- [OIFW-08] OLIVEIRA J.F.G., FRANCA T.V., WANG J.P.: Experimental analysis of wheel/workpiece dynamic interactions in grinding.
- [Orna-95] ORNAF A.: Adaptacyjne sterowanie wieloparametrowe optymalizujące proces szlifowania kłowego wałków. Praca doktorska, Politechnika Łódzka, 1995.
- [Pase-06] PASEK Z.J.: Exploration of rough sets theory use for manufacturing process monitoring, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2006, Vol. 220, 3, s. 365-374.
- [PaŚl-07] PAWLAK Z., SŁOWIŃSKI R., „Zbiory przybliżone we wspomaganiu decyzji”, [w:] Kulczycki P., Hryniewicz O., Kacprzyk J. (eds.), Techniki informacyjne w badaniach systemowych, WNT, Warszawa 2007, s. 181-208.
- [Pawl-82] PAWLAK Z., Rough sets, International Journal of Information & Computer Sciences, 1982, Vol. 11, s. 341-356.
- [PeSo-08] PERZYK M., SOROCZYŃSKI A.: Porównanie wybranych narzędzi do tworzenia wiedzy inżynierskiej dla produkcji odlewniczej. Mat. Konf. 48 Międzynarodowej Konferencji Naukowej Krzepnięcie i Krystalizacja Metali – 2008.
- [PhOz-95] PHAM D.T., OZTEMEL E.: An integrated neural network and expert system tool for statistical process control. Proceedings of the I MECH E, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 1995, Vol. 209, s. 91-97.

- [PiKR-09] PIŁACIŃSKA M., KUJAWIŃSKA A., ROGALEWICZ M.: Manufacturing process state evaluation with the use of rough set approach – method assumptions and description. [w:] Fertsch M., Grzybowska K., Stachowiak A. (eds.), Efficiency of production processes. Monograph, Publishing House of Poznań University of Technology, Poznań 2009, s. 75-92.
- [PiKR-11] PIŁACIŃSKA M., KUJAWIŃSKA A., ROGALEWICZ M.: An expert system for the manufacturing process state evaluation – assumptions, [w:] Jałowiecki P., Łukasiewicz P., Orłowski A. (eds.), Information Systems in Management. Business Intelligence and Knowledge Management, WULS Press, Warsaw 2011, s. 66-77.
- [PIDP-00] PLICHTA S., DRZYCIMSKI M., PLICHTA J.: Koncepcja układu sterowania szlifierki z wykorzystaniem sieci neuronowej. Obróbka ścierna – podstawy i technika. Red. K.E. Oczko. Materiały XXIII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2000, s. 342-347.
- [Plic-02] PLICHTA S.: Ocena procesu szlifowania z wykorzystaniem metod pomiaru emisji akustycznej. Prace Naukowe Inst. Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, Seria: Konferencje – XXV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Wrocław 2002, s. 279-286.
- [PrKr-05] PRITSCHOW G., KRAMER C.: Open System Architecture for Drives. Annals of the CIRP, Vol. 54/1/2005, s. 375-378.
- [RaDo-90] RANGWALA S., DORNFELD D.: Sensor integration using neural networks for intelligent tool condition monitoring. Trans. Of the ASME. Journal of Engineering for Industry, Vol. 112, Aug. 1990, s. 219- 228.
- [RaLL-00] RAFAŁOWICZ J., LEŻAŃSKI P., LAJMERT P.: Sterowanie i nadzorowanie procesu szlifowania kłowego wałków. Obróbka ścierna – podstawy i technika. Red. K.E. Oczko. Materiały XXIII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2000, s. 89-117.
- [ReWe-95] REUBER M.J., WEBSTER J.A.: Preliminary Study on the Development of a Sensor System for In-Process Measurement of Grinding Wheel Surface Topography. Proceedings of the 4th International Conference on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing AC'95, Warszawa, 28-29.08.1995, s. 307-314.
- [RoLM-96] ROWE W.B., LI Y., MILLS B., ALLANSON D.R.: Application of Intelligent CNC in Grinding. Computers in Industry. No 31 (1996), s. 45-60.
- [RoWe-00] ROJEK-MIKOŁAJCZAK I., WEISS Z.: Inteligentna baza danych w planowaniu operacji szlifowania. Obróbka ścierna – podstawy i technika. Red. K.E. Oczko. Materiały XXIII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2000, s. 310-315.
- [Rutk-06] RUTKOWSKI L.: Metody reprezentacji wiedzy z wykorzystaniem zbiorów przybliżonych. [w:] Metody i techniki sztucznej inteligencji, PWN, Warszawa 2006, s. 20-51.
- [RYIM-94] ROWE W.B., YAN L., INASAKI I., MALKIN S.: Applications of artificial intelligence in grinding. Annals of the CIRP, 43(1994)2, s. 521-531.
- [SaIn-92] SAKAKURA M., INASAKI I.: A Neural Network Approach to the Decision-Making Process for Grinding Operations. Ann. of the CIRP Vol. 41/1/1992.
- [SaIn-93] SAKAKURA M., INASAKI I.: Intelligent Data Base for Grinding Operations. Annals of the CIRP, Vol. 42/1/1993, s. 379-382.

- [Shaw-72] SHAW M.C.: Fundamentals of Grinding. Proceedings of the Inter. Grinding Conf. "New Developments in Grinding", Cornege Mellon Univ., Cornege Press, 1972.
- [Słow-00] SŁOWIŃSKI R.: Rozszerzenie teorii zbiorów przybliżonych na atrybuty ze skalą preferencji, [in]: Informatyka Teoretyczna – Metody Analizy Informacji Niekompletnej i Rozproszonej – Materiały Konferencyjne, Politechnika Białostocka, Białystok, 2000, s. 114-127.
- [Smyt-94] SMYTH P.: Hidden Markov models for fault detection in dynamic systems. Pattern Recognition, Vol. 27, No. 1, 1994, s. 149-164.
- [SnBr-69] SNOEYS R., BROWN D.: Dominating parameters in grinding wheel and workpiece regenerative chatter. Proceedings of the 10-th Machine Tool Design and Research Conference, 1969, s. 325-348.
- [SoDo-94] SOKOŁOWSKI A., DORNFELD D.A.: Intelligent System for Cutting Parameter Optimization and Design of Cutting Process Monitoring Systems. Proc. 1st S.M. Wu Symposium on Manufacturing Science, Northwestern University Evanston, Illinois, 1994, s. 19-26.
- [SoKo-95] SOKOŁOWSKI A., KOSMOL J.: Cutting Process Supervision: Review of Artificial Intelligence Application. Proc. 6th Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems: Diagnostics and Supervising in Flexible Manufacturing, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1995, s. 113-130.
- [Śpie-91] ŚPIEWAK S.: A predictive monitoring and diagnosis system for manufacturing. Annals of the CIRP, Vol. 40/1/1991, s. 401-404.
- [Śpie-95] ŚPIEWAK S.: Emerging Trends in Automatic Supervision of Machine Tools. Proceedings of the 4th International Conference on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing AC'98, Warszawa, 28-29.08.1995, s. 49-60.
- [SSGM-01] SŁOWIŃSKI R., STEFANOWSKI J., GRECO S., MATARAZZO B.: Rough set based processing of inconsistent information in decision analysis. Control and Cybernetics, Vol. 29, s. 379-404.
- [Stef-01] STEFANOWSKI J.: Algorytmy indukcji reguł decyzyjnych w odkrywaniu wiedzy. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Seria Rozprawy, nr 361, Poznań 2001.
- [STQS-00] SHEN L., TAY F.E. H., QU L., SHEN Y.: Fault diagnosis using Rough Sets Theory. Computers in Industry, 43 (2000), s. 61-72.
- [SuGr-00] SUSIĆ E., GRABEC I.: Characterization of the grinding process by acoustic emission. International Journal of Machine Tools and Manufacture Nr 40 (2000), s. 225-238.
- [SuPl-03] SUTOWSKI P., PLICHTA S.: Wykorzystanie sygnału emisji akustycznej do monitorowania chropowatości powierzchni przedmiotu szlifowanego. Obróbka ścierna – tendencje rozwoju. Red. A. Koziarski, A. Gołabczak. Materiały XXVI Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Łódź 2003, s. 177-182.
- [SuPl-04] SUTOWSKI P., PLICHTA S.: Wykorzystanie wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej do oceny zużycia ściernicy. Zeszyty Naukowe Wyd. Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej Nr 36, XXVII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Sarbinowo, wrzesień 2004, s. 367-375.
- [Szaf-88] SZAFARCZYK M.: Automatyczny nadzór i diagnostyka w systemach obróbkowych. Mat. I Nauk. Szkoły Nadzorowania i Diagnostyki Procesów Obróbkowych, Wrocław 1988, s. 37-48.

- [Szaf-94] SZAFARCZYK M.: Kierunki rozwoju sterowań obrabiarek i systemów obróbkowych. *Mechanik*, 1994, Nr 1.
- [Szaf-96] SZAFARCZYK M.: Sterowanie i napęd obrabiarek. *Mat. Ogólnokrajowej Konferencji Obrabiarkowej KO'96*, Warszawa 1996.
- [SzCh-90] SZAFARCZYK M., CHISHOLM A.W.J.: Automatic supervision in manufacturing systems. Principles, classification and terminology. *Proceedings of the 4th International Conference on Automatic Supervision, Monitoring and adaptive Control in Manufacturing AC'90*, Rydzyna, 1990.
- [TJJS-06] TETI R., JAWAHIR I.S., JEMIELNIAK K., SEGRETO T., CHEN S., KOSSAKOWSKA J.: Chip Form Monitoring through Advanced Processing of Cutting Force Sensor Signals. *Annals of the CIRP*, Vol. 55/1/2006.
- [TJOD-10] TETI R., JEMIELNIAK K., O'DONNELL G., DORNFELD D.: Advanced monitoring of machining operations. *Annals of the CIRP*, Vol. 59/2/2010, s. 717-739.
- [TlAn-83] TLUSTYJ., ANDREWS G.C.: A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining. *Annals of the CIRP*, Vol. 32/2/1983, s. 563-572.
- [TöFB-02] TÖNSHOFF H.K., FRIEMUTH T., BECKER J.C.: Process Monitoring in Grinding. *Annals of the CIRP*, Vol. 51/2/2002, s. 551-571.
- [TöNi-95] TÖNSHOFF H.K., NITIDEM-NDENGUE E.: Intelligent Sensor Modules for Decentralized Signal Processing in Monitoring and Diagnostic Systems. *Proceedings of the 4th International Conference on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing AC'95*, Warszawa, 28-29.08.1995, s. 61-71.
- [TöPC-94] TÖNSHOFF H.K., PAUL T., CZENKUSCH C.: Informationssystem zur Gestaltung und optimierung von Schleifprozessen. *VDI-Zeitschrift*, 136/10/1994, s. 82-86.
- [TPIP-92] TÖNSHOFF H.K., PETERS J., INASAKI I., PAUL T.: Modelling and Simulation of Grinding Processes. *Annals of the CIRP*, Vol. 41/2/1992, s. 677-688.
- [TrZM-92] TRMAL G.J., ZHU C.B., MIDHA P.S.: An expert system for grinding process optimization. *Journal of Materials Processing Technology*, Nr 33/4 (1992), s. 507-517.
- [TsKE-05] TSENG T., KWON Y., ERTEKIN Y.: Feature-based rule induction in machining operation using rough set theory for quality assurance, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2005, 21, s. 559-567.
- [TWKK-88] TÖNSHOFF H.K., WULFSBERG J.P., KALS H.J.J., KÖNIG W., LUTTERVELT C.A.: Developments and trends in monitoring and control of machining processes. *Annals of the CIRP*, Vol. 37/2/1988, s. 611-622.
- [UMMK-01] UEDA K., MARKUS A., MONOSTORI L., KALSH.J.J., ARAI T.: Emergent Synthesis Methodologies for Manufacturing. *Annals of the CIRP*, Vol. 50/2/2001.
- [Urba-02] Urbaniak M.: System oceny użytkowych właściwości ściernic. *Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Seria Rozprawy Naukowe*, Z. 315, Łódź 2002.
- [Verk-81] VERKERK J.: Plunge grinding data for the control of traverse grinding operation. *Proceedings of the 8th North American Manufacturing Research Conference*, May 1981, s. 80-87.
- [ViSh-98] VISHNUPAD P., SHIN Y.C.: Intelligent optimization of grinding processes using fuzzy logic. *Proceedings of I. MECH. E, Journal of Engineering Manufacture*, 1998, Vol. 212, s. 647-660.

- [VPGG-00] VARGHESE B., PATHARE S., GAO R., GUO C., Malkin S.: Development of a Sensor-Integrated "Intelligent" Grinding Wheel for In-Process Monitoring. *Annals of the CIRP*, Vol. 49/1/2000, s. 231-234.
- [WaBa-03] WARKENTIN A., BAUER R.: Analysis of Wheel Wear Using Force Data in Surface Grinding. *Transaction of the CSME/de la SCGM*, 2003, s. 193-204.
- [WaGa-06] WANG L., GAO R.X. (eds.): *Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing*, Springer Verlag London, Springer Series in Advanced Manufacturing, 2006.
- [WaMK-01] WANG L., MEHRABI M.G., KANNATEY-ASIBU E.: "Hidden Markov Model-based Tool Wear Monitoring in Machining Processes by Wavelet Analysis", *ASME J. Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 12, No. 3, 2001, s. 651-658.
- [WeDL-96] WEBSTER J., DONG W.P., LINDSAY R.: Raw Acoustic Emission Signal Analysis of Grinding Process. *Annals of the CIRP*, Vol. 45/1/1996, s. 335-340.
- [WeMB-94] WEBSTER J., MARINESCU I., BENNET R.: Acoustic Emission for Process Control and Monitoring of Surface Integrity during Grinding. *Annals of the CIRP*, Vol. 43/1/1994, s. 299-304.
- [Wern-71] WERNER G.: *Kinematik und Mechanik des Schließprozesses*. Dissertation T.H. Aachen, 1971.
- [WeSc-79] WECK M., SCHIEFER K.H.: Interaction of the dynamic behavior between machine tool and cutting process for grinding. *Annals of the CIRP*, Vol. 28/1/1979.
- [West-94] WESTKAMPER E.: Zero-Defect Manufacturing by Means of a Learning Supervision of Process Chains. *Annals of the CIRP*, Vol. 43/1/1994, s. 405-408.
- [WHKK-11] WEGENER K., HOFFMEISTER H.-W., KARPUSCHEWSKI B., KUSTER F., HAHMANN W.-C., RABIEY M.: Conditioning and monitoring of grinding wheels. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 60 (2011), s. 757-777.
- [Wójc-06] WÓJCIK R.: Wpływ strumienia energii szlifowania na wybrane właściwości warstwy wierzchniej. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Seria Rozprawy Naukowe, Z. 351, Łódź 2006.
- [Wrąb-93] WRĄBEL D.: Przydatność pomiarów sił skrawania oraz drgań układu OUPN do diagnozowania i nadzoru stanu ściernicy w procesie wglębnego kłowego szlifowania wałków. Praca doktorska, Politechnika Łódzka, 1993.
- [WWAW-01] WANG Z., WILLETT P., DeAGUIAR P.R., WEBSTER J.: Neural network detection of grinding burn from acoustic emission. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* Nr 41 (2001), s. 283-309.
- [XiLA-10] XIE N., CHEN L., LI A.: Fault diagnosis of multistage manufacturing systems based on rough set approach. *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, (2010) 48, s. 1239-1247.
- [XiMD-93] XIAO G., MALKIN S., DANAI K.: Autonomous system for multistage cylindrical grinding. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, December 1993, s. 667-672.
- [YaFi-95] YAGER R., FILEV D.: *Podstawy modelowania i sterowania rozmytego*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995.
- [Zade-65] ZADEH L.A.: Fuzzy sets. *Information and control*, Vol. 8, s. 338-353.
- [Żela-76] ŻELAZNY M.: *Podstawy automatyki*. PWN, Warszawa 1976.

- [ZhKF-02] ZHAI L.Y., KHOO L.P., FOK S.C.H.: Feature extraction using rough set theory and genetic algorithms – an application for the simplification of product quality evaluation. *Computers & Industrial Engineering*, 43 (2002), s. 661-676.
- [ZhWH-09] ZHU K., WONG Y.S., HONG G.S.: Wavelet analysis of sensor signals for tool condition monitoring: A review and some new results. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49 (2009), s. 537-553.

CHARAKTERYSTYKA ZAWODOWA AUTORA

Paweł Leżański ukończył studia w Politechnice Łódzkiej na Wydziale Mechanicznym w 1974 roku, uzyskując dyplom magistra inżyniera mechanika o specjalności obrabiarki, narzędzia i technologia budowy maszyn. W tym samym roku rozpoczął pracę w Instytucie Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn PŁ jako asystent. Od początku jego praca naukowa skierowana była na problematykę automatyzacji procesów obróbki mechanicznej. Były to zagadnienia związane ze sterowaniem numerycznym obrabiarek, a następnie zagadnienia dotyczące sterowania adaptacyjnego procesu szlifowania. Podsumowaniem tych zainteresowań badawczych była ukończona w 1983 roku praca doktorska poświęcona modelowi procesu czołowego szlifowania płaszczyzn w aspekcie zastosowania sterowania adaptacyjnego. Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych, od początku 1984 roku pracuje na stanowisku adiunkta. W latach 2001-2004 pełnił obowiązki kierownika Zakładu Automatyzacji Obrabiarek.

Po doktoracie, jego prace naukowe koncentrowały się głównie na zagadnieniach diagnostyki i automatycznego nadzorowania procesu szlifowania kłowego wałków. W związku z tym, w latach 1988-1998, jako główny wykonawca brał udział w projektach badawczych CPBP, a następnie KBN nr 0446/S1/92/03 i nr 7 T07D 047 08 poświęconych tym zagadnieniom. W latach 1998-2007 był kierownikiem dwóch projektów KBN nr PB 242 T07 98 14 i nr PB 4 T07D 014 27 również dotyczących tej tematyki. Od 2008 roku jest członkiem zespołu wykonawczego zadania „Inteligentny system szlifowania trudnoobrabialnych stopów lotniczych” projektu kluczowego programu operacyjnego innowacyjna gospodarka. Ponadto, w latach 1994-1995, był wykonawcą projektu badawczego Wspólnoty Europejskiej nr F12T-CT92-0029/ERBCIPDCT930444 dotyczącego sterowania robotów mobilnych.

Paweł Leżański jest autorem lub współautorem 41 publikacji, w tym 3 artykułów w czasopismach zagranicznych z listy filadelfijskiej. Jest współautorem 1 patentu. Jest też współautorem wielu sprawozdań z projektów badawczych i opracowań dla przemysłu. Jego prace były przedmiotem prezentacji na kilkudziesięciu konferencjach i sympozjach naukowych w Polsce i za granicą.

Paweł Leżański zdobywał doświadczenia zawodowe również w przemyśle i poza Polską. W roku 1975 odbył sześciotygodniowy staż przemysłowy w CBKO Pruszków, a w 1977 pięcioletniowy staż w zakładach budowy obrabiarek w Moskwie. W latach 1987-1988 był stypendystą Fulbrighta w Stanach Zjednoczonych, 15 miesięcy w Arizona State University oraz 3 miesiące w University of California w Berkeley. W latach 1994-1995, w ramach realizacji projektu Wspólnoty Europejskiej odbył kilka wizyt roboczych w Université Libre w Brukseli. Brał udział w programie Foresight

Technologiczny dla Regionu Łódzkiego LORIS WIZJA w charakterze eksperta w zakresie mechatroniki.

W ramach działalności dydaktycznej, Paweł Leżański prowadzi wykłady, laboratoria i projektowanie z zakresu elastycznych i inteligentnych systemów wytwarzania, przetwarzania dynamicznych sygnałów pomiarowych oraz metod sztucznej inteligencji. Od wielu lat prowadzi analogiczne zajęcia w języku angielskim dla studentów Centrum Kształcenia Międzynarodowego PŁ. Jest współautorem 1 skryptu i wielu innych materiałów pomocniczych do dydaktyki.

Za swoją działalność, Paweł Leżański został odznaczony Srebrnym Krzyżem Zasługi, Złotym Medalem za Długoletnią Służbę, Srebrną Honorową Odznaką Stowarzyszenia Inżynierów Mechaników Polskich oraz wyróżniony licznymi nagrodami JM Rektora Politechniki Łódzkiej.

AUTOMATIC SUPERVISION OF EXTERNAL CYLINDRICAL PLUNGE GRINDING

ABSTRACT

In the work, theoretical and experimental analysis of the external cylindrical plunge grinding process as a supervision object is made to work out general rules and recommendations for automatic intelligent supervision of this process.

The problem is considered in the three main groups of issues. Firstly, theoretical and experimental analysis of the external cylindrical plunge grinding process is made. Next, usefulness of selected features of the measured process variables to be symptoms of process states and results is experimentally verified. The third group of issues is related to development of a process model and its use in process state and result classification.

After literature study and theoretical analysis of the process, it is established that to identify the incorrect states of the process, an acceptable working area has to be known. This area is delimited by a dynamic stability limit for small values of the specific material removal rate and by a burn and other thermal damage constraint for higher values of it. Additionally this area is narrowed down by a restriction resulting from the required surface roughness, the allowable normal force and the allowable work speed. This decides on process and workpiece quality parameters to be supervised. The type of wheel wear, the state of wheel macro- and micro-geometry, the state of thermal damages and the workpiece roughness are recognized as such parameters. Carried out analysis of phenomena and processes related to these parameters allows the condition for process monitoring, signal processing and feature extraction to be established.

Experimental research consists of grinding tests encompassing on-line and off-line measurements. The cutting forces, vibration, the raw and RMS value of the acoustic emission signals are the on-line measurements of process variables during each grinding test. The profile and waviness of the grinding wheel cutting surface and the workpiece roughness are the off-line measurements of quantities directly characterizing the wheel state and the workpiece surface quality after every second test. The state of workpiece thermal damages is determined on the basis of the index expressing value of heat flux density entering the workpiece. The FFT procedure, the wavelet transform and statistical analysis are used for feature extraction from the measured signals. The utilized signal features are selected on the basis of literature study as well as on theoretical and experimental analysis. As a result, every process case is characterized by 17 process state features representing different types of process phenomena related to the process limitations and 5 quantities belonging to important process

results: the type of wheel wear, the state of wheel makro- and micro-geometry, the state of thermal damages and the workpiece roughness.

Next, the Dominance-based Rough Set Approach (DRSA) is proposed as a methodology for development of a process model and its use in process state and results classification. The DRSA allows for the extracting of knowledge hidden in the experimental data by the induction of the set of rules which creates a model of the grinding process. After an iterative feature selection procedure the induction of rule sets for each process result are conducted using the VC-DomLEM algorithm. Following this, the induced sets of rules are evaluated using the leave-one-out method. The induced rule model of the process allows all the example grinding cases gathered during the tests to be classified according to the original classes determined for the 5 different criteria of the process evaluation and it can be used for the classification of new process cases. So it can be employed as a knowledge base of an expert system for the external cylindrical plunge grinding process state evaluation and diagnosis.

