

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA WYDZIAŁ MECHANICZNY KATEDRA INŻYNIERII PRODUKCJI

mgr inż. Paweł Sutowski

OCENA OKRESU TRWAŁOŚCI ŚCIERNIC Z WYKORZYSTANIEM WARTOŚCI SKUTECZNEJ SYGNAŁU EMISJI AKUSTYCZNEJ W PROCESIE OBWODOWEGO SZLIFOWANIA PŁASZCZYZN

Rozprawa doktorska

Promotor:

dr hab. inż. Jarosław Plichta profesor nadzwyczajny Politechniki Koszalińskiej

Koszalin 2008

Badania realizowano w ramach Projektu współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego (75%) oraz środków budżetu państwa (25%) w ramach Zintegrowanego Programu Operacyjnego Rozwoju Regionalnego.







INFORMACJA

Część badań eksperymentalnych zrealizowano w ramach udziału w projekcie "*System stypendiów doktoranckich wspierających rozwiązania innowacyjne gospodarki regionu*" zrealizowanego ze środków finansowanych pozyskanych z *Działania 2.6 Zintegrowanego Programu Operacyjnego Rozwoju Regionalnego – Priorytet 2.*, współfinansowanego ze środków *Europejskiego Funduszu Społecznego* (EFS) w latach 2005 – 2008. W ramach tego projektu wykonano ilościową ocenę naprężeń własnych (w skali makronaprężeń) zalegających w warstwie wierzchniej przedmiotów szlifowanych oraz dokonano porównania zmian wartości sygnałów emisji akustycznej (EA) zarejestrowanych w trakcie przebiegu procesu obróbki (zachodzących w funkcji czasu pracy ściernicy) ze zmianami wartości naprężeń maksymalnych (δ_{max}). Wyniki badań oraz analizę zrealizowanego zadania umieszczono w rozdziałach 4.8.2 oraz 4.8.4 niniejszej rozprawy doktorskiej.

SPIS TREŚCI

W	YKA	Z WA	ŻNIEJSZYCH SYMBOLI I AKRONIMÓW	5		
1.	WS	TĘP		9		
2.	ANALIZA LITERATURY					
	2.1. Zużycie ściernicy w procesie szlifowania					
	2.2. Wpływ zużycia ścienicy na wyniki obróbki i okres trwałości narzedzia					
	2.3. Metody oceny zużycia ściernicy					
	2.4.					
		2.4.1.	Emisja akustyczna	21		
		2.4.2.	Źródła impulsów emisji akustycznej w procesie szlifowania	23		
	2.5.	Wyko	przystanie emisji akustycznej do oceny procesu szlifowania			
		2.5.1.	Badanie zużycia ściernicy			
		2.5.2.	Wykrywanie przypaleń i innych wad przedmiotu obrabianego			
		2.5.3.	Ocena okresu trwałości ściernicy			
		2.5.4.	Sterowanie procesem szlifowania			
	2.6.	Wnios	ski z analizy literatury			
3.	CEL, HIPOTEZA I ZAKRES PRACY					
	3.1.	Cele p	эгасу	43		
	3.2. Hipoteza badawcza					
	3.3. Zakres pracy					
4.	BADANIA DOŚWIADCZALNE					
	4.1. Cel i zakres badań					
	4.2.	Metoo	dyka badań			
		4.2.1.	Program badań	51		
		4.2.2.	Techniki pomiarowe	54		
		4.2.3.	Badania rozpoznawcze			
		4.2.4.	Badania właściwe	61		
	4.3.	Stano	wisko badawcze	66		
		4.3.1.	Stanowisko do pomiaru siły szlifowania i emisji akustycznej			
	4.4. Parametry i warunki badań					
		4.4.1.	Ściernice zastosowane w badaniach	73		
		4.4.2.	Parametry profilowania i ostrzenia ściernic	74		
		4.4.3.	Prędkości obwodowe ściernic	74		
		4.4.4.	Prędkości przedmiotu obrabianego i stołu szlifierki	75		
		4.4.5.	Wartości styku roboczego	75		
		4.4.6.	Przedmiot obrabiany			
		4.4.7.	Rodzaj i wydatek cieczy chłodząco-smarującej	77		

	4.5.	Stanov	wiska pomiarowe	77		
		4.5.1.	Pomiary zużycia krawędziowego ściernic	77		
		4.5.2.	Pomiary zmian zużycia promieniowego ściernic	79		
		4.5.3.	Pomiary zmian mikrogeometrii powierzchni ściernic i próbek	80		
		4.5.4.	Wyznaczenie naprężeń w warstwie wierzchniej	81		
	4.6.	Wynik	xi badań rozpoznawczych i ich analiza	83		
		4.6.1.	Ustalenie liczby powtórzeń	83		
		4.6.2.	Wyznaczenie parametrów i zakresu badań właściwych	85		
		4.6.3.	Uproszczone modele matematyczne parametrów procesu	91		
	4.7. Wnioski z badań rozpoznawczych					
	4.8.	Wynik	si badań właściwych i ich analiza	101		
		4.8.1.	Analiza zmian stanu geometrii CPS	104		
		4.8.2.	Analiza zmian warstwy wierzchniej szlifowanych próbek	119		
		4.8.3.	Analiza zmian składowych siły i mocy szlifowania	142		
		4.8.4.	Analiza zmian sygnałów emisji akustycznej	165		
	4.9.	Wnios	ki z badań właściwych	270		
5.	DIA	GNOS	STYKA ZDOLNOŚCI SKRAWNEJ ŚCIERNICY			
	ΖW	/YKOI	RZYSTANIEM PARAMETRÓW SYGNAŁU EA	278		
	5.1.	Ocena	zużycia ściernicy z wykorzystaniem systemu FIS	282		
	5.2.	Konce	pcja realizacji sprzętowej opracowanego inteligentnego systemu nadzorowania	301		
	5.3.	Wnios	ki z wykorzystania sygnału EA w diagnostyce zużycia ściernicy	302		
6.	POI	DSUM	OWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE	304		
	6.1. Wnioski poznawcze					
	6.2.	Wnios	ki dotyczące wykorzystania wyników pracy	306		
	6.3.	Wnios	ki dotyczące dalszych badań	307		
BII	IBLIOGRAFIA					

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI I AKRONIMÓW

Wykaz ważniejszych symboli i akronimów obejmuje tylko istotne oznaczenia z niniejszej pracy zawarte głównie w rozdziałach 4 i 5. Pozostałe opisane są w tekście, bezpośrednio w miejscu ich zastosowania.

Symbole do rozdziału 4 i 5

α	– przyjęty poziom istotności statystycznej, $\alpha = 0.05$,
α_{kr}	– kąt zużycia krawędziowego ściernicy, °,
δEA	 dokładność pomiarowa czujnika emisji akustycznej, %,
δEA_{RMS}	- dokładność wyznaczenia wartości skutecznej emisji akustycznej przez konwerter, %,
δF	– dokładność pomiaru składowych siły szlifowania, %,
δR	– błąd przetwarzania sygnału przez przetwornik A/C, V,
З	– połowa kąta wierzchołkowego ziarna ściernego, dla ziarna elektrokorundowego $\varepsilon = 60^\circ$, [PliJ1980]
$ au_s$	– stała czasowa, <i>ms</i> ,
Δf	– strzałka ugięcia swobodnego końca próbki w trakcie wyznaczania naprężeń, μm ,
$\Delta h_{(w)}$	– grubość usuniętej warstwy materiału w trakcie wyznaczania naprężeń, µm,
Δq	- wartość średnich kwadratowych miejscowych wzniosów profilu, °, [N87/4256/2],
Δr_s	– zużycie promieniowe ściernicy, mm, [N92/1002/5],
Δr_{kr}	– zużycie krawędziowe ściernicy, mm,
ρ	– masa właściwa (gęstość), $kg \cdot m^{-3}$, [N00/31-3],
σ_{max}	– naprężenia maksymalne warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego, MPa,
	$(1Pa = 1kg \cdot m^{-1}s^{-2} = 1N \cdot m^{-2}])$
a_d	- dosuw obciągacza w procesie ostrzenia ściernicy między kolejnymi skokami, mm, [OP1986],
a _e	 – styk roboczy, styk ściernicy określony w płaszczyźnie roboczej prostopadle do kierunku ruchu posu- wowego podstawowego, mm, [N92/1002/5],
a _{zsr}	- średnia elementarna głębokość szlifowania, mm, [PliJ1980],
A_{kr}	- powierzchnia zużycia krawędziowego ściernicy od strony natarcia, mm ² , [OP1986],
A_s	– całkowita powierzchnia zużycia ściernicy, mm ² , [OP1986],
A_{sk}	- całkowita powierzchnia zużycia krawędziowego ściernicy, mm ² , [OP1986],
A_{sr}	– powierzchnia zużycia promieniowego, mm ² , [OP1986],
b_D	- szerokość czynna ściernicy w przekroju osiowym, mm, [N92/1002/5],
<i>b</i> (w)	– szerokość próbki, mm,
$b_{(s)}$	– szerokość ściernicy, <i>mm</i> ,
B_{kr}	- długość czynnej krawędzi ściernicy (dł. zużycia krawędziowego), mm,
d	– przyjęta precyzja estymacji, [Bar1982],
d_s	- średnica zewnętrzna ściernicy, mm, [N92/1002/5],
D	– punkt główny szlifowania, [N92/1002/5],
$D^2_{(Z)}$	– wariancja rzędnych wzniesień profilu na czynnej powierzchni ściernicy, μm^2 ,
EA_{RAW}	- pierwotny, nieprzetworzony (ang. raw) sygnał emisji akustycznej, V,
EA_{RMS}	– wartość skuteczna sygnału emisji akustycznej, V,
E_{EA}	– energia sygnału emisji akustycznej, $W \cdot s = J$,
f	– częstotliwość próbkowania sygnału, Hz (1 Hz = 1 s^{-1}), [N01/31-2, N01/31-7],

f_a	- posuw osiowy stołu szlifierki, mm/skok, [N92/1002/5],
f_r	- posuw promieniowy stołu szlifierki, mm/skok, [N92/1002/5],
F_{kr}	– wartość krytyczna rozkładu Fishera-Snedecora, [Sta2001], [Kuk2002],
F_c	– składowa styczna siły szlifowania, N (1N=1kg·m·s ⁻²), [N92/1002/4],
$F_{(w)}$	– pole powierzchni obrabianej, mm^2 ,
F_n	– składowa normalna siły szlifowania, $N(1N=1kg \cdot m \cdot s^{-2})$, [N92/1002/4],
g_n	– przyspieszenie ziemskie normalne (równe 9,80665 $m \cdot s^{-2}$ na szer. geograficznej 45° i poziomie morza),
G	– wskaźnik szlifowania, [N92/1002/5],
$h_{\sigma max}$	– oszacowana głębokości zalegania najwyższych wartości naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego, μm ,
h_{eq}	- grubość szlifowania równoważona na jednostkę szerokości czynnej ściernicy, mm, [N92/1002/5],
$h_{(w)}$	– wysokość próbki, <i>mm</i> ,
<i>i</i> _(w)	-liczba szlifowanych przedmiotów (próbek), szt.,
Ι	– natężenie prądu elektrycznego, A, [N02/31-5],
$K_{(\varepsilon,r)}$	– współczynnik kształtu ziarna (dla ziarna elektrokorundowego $K(\varepsilon, r) = 1, 2$), [PliJ1980],
K_{CPS}	 – geometryczny wskaźnik zdolności skrawnej czynnej powierzchni ściernicy,
$K(EA_{RM})$	s) – kurtoza (współczynnik spłaszczenia) wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej,
$K_{\beta}(EA_{RM})$	s) – współczynnik koncentracji rozkładu beta dla wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej,
$S_{k\beta}(EA_{RM})$	MS) – współczynnik asymetrii rozkładu beta dla wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej,
l_a	- długość ramienia pomocniczego w układzie do mierzenia strzałki ugięcia, mm,
l_D	– długość zarysu czynnego ściernicy, mm, [N92/1002/5],
l_g	– geometryczna długość styku (strefy szlifowania), mm, [N92/1002/5],
l_n	– długość odcinaka pomiarowego, mm, [N99/4287],
l_r	- długość odcinaka elementarnego (dla profilu chropowatości), mm, [N99/4287],
l_{st}	- starcie względne wzniesień profilu (dla wierzchołków ziaren aktywnych), mm,
l_{tr}	- długość trawionego odcinka próbki w trakcie pomiaru naprężeń, mm,
$l_{(w)}$	– długość próbki, mm,
l_{rz}	 – rzeczywista (rozwinięta) długość profilu chropowatości, µm,
L_0	– względna długość profilu, [Now1991],
L_{wa}	– sumaryczna względna długość wierzchołków falistości na poziomie maksymalnych grubości skrawa- nych jednym ziarnem, <i>mm</i> ,
т	– masa próbki, <i>g</i> ,
$m_4(EA_{RN})$	$_{MS}$ – moment 4. rzędu dla wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej, V^4 ,
n	– liczebność próby, liczba pomiarów lub powtórzeń, szt., [Bar1982],
n_s	– prędkość obrotowa ściernicy, <i>obr./min</i> ,
Ν	– liczba elementów populacji, szt., [Bar1982],
N_{st}	– liczba ostrzy statycznych na określonej głębokości, szt., [OP1986],
p_s	$-$ względna moc szlifowania, $W \cdot s/mm^3 = N/mm^2$,
P_s	$-$ moc szlifowania, $W = N \cdot m/s$,
q	– stosunek prędkości skrawania do prędkości posuwu, [N92/1002/5],
q_{Fc}	– obciążenie jednostkowe warstwy wierzchniej składową styczną siły szlifowania, N/mm ² , [PliS1986],
q_{Fn}	– obciążenie jednostkowe warstwy wierzchniej składową normalną siły szlifowania, <i>N/mm²</i> , [PliS1986],
q_{RMS}	– wskaźnik energii impulsów emisji akustycznej przypadającej na jednostkową powierzchnię kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym, <i>J/mm</i> ² ,

 Q_c – wydatek cieczy chłodząco-smarującej, *l/min* lub m^3/min (1*l* = 10⁻³ m^3),

QN_z	- udział strefy quasi nominalnej (ang. <i>quasi-nominal zone</i>) w SCGC, stanowiącej różnicę pomiędzy powierzchnią całkowitą i sumą powierzchni stref roboczej i wierzchołkowej, %, [Kac1999],
Q_s	– współczynnik zużycia ściernicy (ang. <i>wear rate</i>), objętość materiału ściernicy utraconego w jednostce czasu (ang. <i>per unit of time</i>), <i>mm</i> ³ · <i>s</i> ⁻¹ , [N92/1002/5],
Q_w	– wydajność objętościowa szlifowania, objętość materiału przedmiotu obrabianego usunięta w jednostce czasu (ang. <i>per unit of time</i>), <i>mm</i> ³ · <i>s</i> ⁻¹ , [N92/1002/5],
r_s	– promień ściernicy, <i>mm</i> , [N92/1002/5],
r_{ws}	– średnia wartość promienia zaokrąglenia wierzchołków profilu, μm ,
P_f	- powierzchnia szlifowania związana z posuwem stycznym stołu szlifierki, mm ² , [N92/1002/5],
P_p	- powierzchnia szlifowania związana z posuwem osiowym stołu szlifierki, mm ² , [N92/1002/5],
P_r	- powierzchnia szlifowania związana z posuwem promieniowym stołu szlifierki, mm ² , [N92/1002/5],
R	– współczynnik korelacji wielorakiej, który jest pierwiastkiem z R^2 , [Sta2001],
R^2	 współczynnik wielorakiej determinacji, który jest miarą zmniejszenia się całkowitej zmienności zmiennej zależnej wyjaśnianej przez (wielokrotną) zmienną niezależną, [Sta2001],
R ² _{skor.}	– interpretowane podobnie jak wartość R^2 – jest poprawione o dzielenie przez sumy kwadratów błędu i całkowitą sumę kwadratów dla odpowiednich stopni swobody [Sta2001],
R_a	– średnia arytmetyczna rzędnych profilu, μm, [N99/4287],
R_c	- średnia wartość wysokości wzniesień profilu, μm, [N99/4287],
RMS _{max}	– maksymalna wartość skuteczna sygnału emisji akustycznej, V,
Rmr_{20}	– wartość udziału materiałowego profilu dla poziomu przecięcia profilu $c = 20$, [N99/4287],
RS_m	- średni odstęp miejscowych wzniesień profilu, μm , [N99/4287],
R_z	– wysokość profilu chropowatości według 10. punktów, μm , [N87/04251, N87/4256/2],
$s^2(EA_{RM}$	$_{S}$ – wariancja wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej, V^2 ,
S_{st}	- liczba wierzchołków ziaren (ostrzy) statycznych na jednostkę długości, mm ⁻¹ , [OP1986],
t	-czas, s, [N00/31-1],
t_{kr}	– wartość krytyczna rozkładu t-Studenta, [Sta2001], [Kuk2002],
t_{max}	– okres trwałości ściernicy, s,
t_{tr}	– czas trawienia próbki w trakcie wyznaczania naprężeń, s,
Т	– temperatura, K lub °C, [N02/31-4],
T _{mart.}	- temperatura przemiany martenzytycznej, K lub °C, [N02/31-4],
T_z	-udział strefy wierzchołkowej (ang. area of top zone) w SCGC, %, [Kac1999],
v_{fa}	– prędkość posuwu osiowego stołu szlifierki, mm·min ⁻¹ , [N92/1002/5],
V_{fd}	– prędkość posuwu obciągacza, mm·min ⁻¹ , [N92/1002/5],
v_{ft}	– prędkość posuwu stycznego (wzdłużnego) stołu szlifierki, mm·min ⁻¹ , [N92/1002/5],
V_{S}	– prędkość obwodowa ściernicy, $m \cdot s^{-1}$, [N92/1002/5],
V_s	- zużycie objętościowe ściernicy, mm^3 , [N92/1002/5],
V_w	– ubytek materiału szlifowanego, mm ³ , [N92/1002/5],
V_z	– udział objętościowy ścierniwa, %,
W_G	– wskaźnik zużycia, [OP1986],
W_z	-udział strefy roboczej (ang. area of working zone) w SCGC, %, [Kac1999],
U	– napięcie prądu elektrycznego, V, [N02/31-5],
<i>y</i> *	– wartość wyjściowa systemu FIS, oszacowane zużycie ściernicy w skali 0 – 10,
Z' _{sr}	– średnia właściwa szybkość promieniowego zużycia objętościowego ściernicy, mm^2s^{-1} , [OP1986].

Indeksy

W przypadku zastosowania takich samych symboli dla dwóch lub więcej parametrów, przy każdym z nich dodano w nawiasach indeksy odnoszące daną wielkość do konkretnego przedmiotu lub cechy:

- s odnosi daną wielkość do ściernicy, [N92/1002/5],
- *w* odnosi daną wielkość do przedmiotu obrabianego, [N92/1002/5],
- *d* odnosi daną wielkość do procesu obciągania lub narzędzia do obciągania ściernicy, [N92/1002/5],
- J odnosi daną wielkość (dany parametr) do ściernicy o nominalnej twardości J,
- *M* odnosi daną wielkość (dany parametr) do ściernicy o nominalnej twardości M.

Akronimy i inne skróty

- 99A60J7V skrót wykorzystany przez autora, zastępujący oznaczenie ściernicy, [N01/603-4]: PN-ISO 603-4:2001 - 1 - 250x32x98 - 99A 60 J 7 V - 42m/s,
- 99A60M7V-skrót wykorzystany przez autora, zastępujący oznaczenie ściernicy, [N01/603-4]:

PN-ISO 603-4:2001 - 1 - 250x32x98 - 99A 60 M 7 V - 42m/s,

- CPS czynna powierzchnia ściernicy (część powierzchni geometrycznej ściernicy, która usuwa materiał podczas obrotu ściernicy), [N92/1002/5],
- EA emisja akustyczna, rozumiana jako metoda pomiarowa wytwarzanych i rejestrowanych fal sprężystych emitowanych w wyniku lokalnej przebudowy struktury materiału,
 - (inaczej: emisja fal naprężeń ang. Stress Wave Emission SWE)
- FIS system wnioskowania rozmytego (ang. Fuzzy Inference System),
- GWC-FIS-systemu wnioskowania rozmytego o stanie ściernicy (ang. Grinding Wheel Condition FIS),
- HRC twardość metalu wyznaczona statystyczną metodą Rockwella, *kgf/mm*², [N91/04355],
 - (ang. Hardness of Rockwell with C scale)
- ISO Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna, [Ber2001],
 - (ang. International Standards Organization)
- NC oznaczenie stali narzędziowej do pracy na zimno, z chromem (Cr), jako zasadniczym pierwiastkiem stopowym, [N86/85023],
- n.d. skrót od "nie dotyczy",
- PN Polska Norma,
- *poziom-p* poziom istotności/prawdopodobieństwa, malejący wskaźnik wiarygodności rezultatu, który odpowiada prawdopodobieństwu popełnienia błędu polegającego na tym, że przyjmujemy uzyskany rezultat jako prawdziwy, tj. reprezentatywny dla populacji, [Sta2001],
- RMS wartość średnia kwadratowa, inaczej: elementarna wartość skuteczna sygnału, która jest statystyczną miarą sygnału okresowo zmiennego, najczęściej dotyczy wielkości elektrycznych, [Ber2001], (ang. root mean square)
- SGP struktura geometryczna powierzchni, [OP1986],
- SCGC symetryczna krzywa geometrycznego styku, [Kac1999], (ang. Symmetrical Curve of Geometrical Contact)
- SI układ SI, Międzynarodowy Układ Jednostek Miar, (franc. Système International d'Unités)
- SSN sztuczne sieci neuronowe,
- *st. współ.* standaryzowany współczynnik regresji, którego wielkość pozwala porównać relatywny wkład, jaki każda ze zmiennych niezależnych wnosi w predykcję zmiennej zależnej,
- t-Student wartość zmiennej x (kwartyl) rozkładu t-Studenta, [Sta2001],
- *w.l.* wartość lingwistyczna przypisana danemu zakresowi rozpatrywanej zmiennej,
- współ. współczynnik regresji dla zmiennej niezależnej.

1.wstęp

Trwałość ściernicy określa się sumą czasów jej pracy od rozpoczęcia szlifowania po zabiegu obciągania, do momentu utraty zdolności skrawnej, ze względu na przyjęte kryterium.

W zależności od rodzaju operacji szlifierskiej, stosuje się różne kryteria trwałości. I tak, w przypadku szlifowania wykończeniowego, kryteriami tymi mogą być: dokładność wymiarowo kształtowa, chropowatość powierzchni szlifowanej lub jej właściwości fizyczne. W przypadku szlifowania wydajnościowego, zasadniczymi kryteriami będą np.: wydajność objętościowa obróbki, siła i moc szlifowania. W obróbce wydajnościowej istotne może być spełnienie tylko jednego kryterium. Natomiast w obróbce wykończeniowej, należy niekiedy spełnić kilka wymagań jednocześnie. Poza tym, w dopuszczalnym obszarze warunków szlifowania mogą mieć zastosowanie różne kryteria, których istotność spełnienia może być odmienna dla różnych przedmiotów szlifowanych.

Stąd też, w celu właściwego określenia okresu trwałości ściernicy ze względu na stan jej własności skrawnych, koniecznym jest stałe lub okresowe kontrolowanie wielkości wyjściowych procesu szlifowania, których dopuszczalne wartości stanowią w danych warunkach technologicznych kryteria trwałości ściernicy.

W warunkach produkcyjnych, kontrola taka jest jednak problematyczna, a często wręcz niemożliwa. Trudno jest bowiem bezpośrednio w trakcie szlifowania kontrolować chropowatość powierzchni szlifowanej, wartość składowych siły szlifowania, temperaturę powierzchni przedmiotu obrabianego lub stan jego warstwy wierzchniej. Dlatego w praktyce przemysłowej w większości przypadków, dokonuje się jedynie oceny szacunkowej zdolności skrawnej ściernicy w oparciu o zaobserwowane zewnętrzne objawy, np. wzrost poziomu drgań, pojawienie się przypaleń na powierzchni szlifowanej lub ton dźwięku wydawanego przez wirującą ściernicę. Jest to jednak ocena w dużej mierze subiektywna i mało dokładna, co w wielu przypadkach prowadzi do przekroczenia dopuszczalnych wartości wielkości wyjściowych procesu szlifowania, dyskwalifikujących przedmiot obrabiany lub zaniżenia dopuszczalnego okresu trwałości ściernicy w obawie przed tymi skutkami.

W związku z powyższym, poszukuje się skutecznej metody monitorowania procesu szlifowania, która umożliwiłaby zarówno ocenę aktualnego stanu zużycia czynnej powierzchni ściernicy (CPS), jak i ocenę jakości powierzchni przedmiotu obrabianego bezpośrednio na stanowisku roboczym.

Największe nadzieje, w tym względzie, wiąże się z analizą sygnału emisji akustycznej (EA), który w postaci impulsów przenosi informacje o zjawiskach zachodzących bezpośrednio w strefie szlifowania. Źródłem impulsów emisji akustycznej w procesie szlifowania od strony narzędzia są: ścieranie i wykruszenia wierzchołków ziaren, ich wyrywanie ze struktury powierzchni ściernicy oraz pękanie mostków spoiwa. Natomiast od strony przedmiotu obrabianego, źródłami tymi mogą być: tarcie, odkształcenia sprężyste i plastyczne oraz przemiany fazowe.

W niniejszej pracy podjęto próbę określenia parametrów (deskryptorów) wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej, umożliwiających ocenę intensywności zużycia czynnej powierzchni ściernicy, a w konsekwencji określenie jej okresu trwałości. Parametry te powin-

ny umożliwić monitorowanie i diagnozowanie procesu szlifowania w celu zapewnienia odpowiednich wartości wielkości wyjściowych (chropowatość powierzchni i naprężenia w warstwie wierzchniej materiału obrabianego) oraz ich powtarzalność w przyjętym okresie trwałości.

Odpowiednio do powyższego celu, intencjonalnym staje się skonstruowanie systemu, którego głównym zadaniem byłoby oszacowanie aktualnego zużycia narzędzia a przewidywanie jakości przedmiotu, co jednocześnie wspomagałoby operatora w podjęciu trafnych decyzji. Na podstawie zgromadzonych informacji ze strefy obróbki, system ten mógłby także samodzielnie podejmować decyzje o przesterowaniu nastaw procesu lub jego zakończeniu.

Pierwszą część rozprawy (rozdz. 2) podzielono na dwa zasadnicze działy, w których przeprowadzono analizę źródeł literaturowych związanych ze zużyciem oraz oceną właściwości użytkowych ściernic, a także zjawiskami emisji akustycznej w procesie szlifowania. Na najważniejsze elementy opisu składa się m.in. charakterystyka wpływu zmian czynnej powierzchni ściernicy na przebieg i wyniki szlifowania, informacje o obecnie stosowanych metodach oceny właściwości eksploatacyjnych i okresu trwałości ściernic, a także opisy źródeł EA oraz parametrów sygnału wraz ze sposobami dotychczasowego wykorzystania emisji akustycznej w zakresie oceny procesu szlifowania.

Wnioski wynikające z tej części pracy pozwoliły ustalić cel i zakres badań oraz postawić przypuszczalną hipotezę w postaci tezy pracy (rozdz. 3).

W drugiej części pracy zaprezentowano wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych, wnioski z zastosowania emisji akustycznej do oceny postępującego stępienia ściernic, oceny okresu ich trwałości oraz powiązania parametrów sygnału EA z jakością przedmiotu obrabianego (rozdział 4).

Ostatnią, trzecią część pracy (rozdz. 5) poświęcono na zaprezentowanie koncepcji sytemu nadzorowania procesu szlifowania z wykorzystaniem sygnału EA, jako głównego czynnika decyzyjnego. Działanie systemu oparto w głównej mierze o metody sztucznej inteligencji, które nie znalazły dotychczas przemysłowego zastosowania, a z pewnością warte są uwagi, co potwierdzają wyniki testów opracowanego rozwiązania na rzeczywistych danych (pochodzących ze stery obróbki).

Ostatecznie należy podkreślić, że cała praca, a w szczególności część analityczna wyników badań oraz adekwatne działanie zaproponowanego systemu diagnostyki ściernic, potwierdza słuszność przyjętej tezy pracy.

2. ANALIZA LITERATURY

2.1. Zużycie ściernicy w procesie szlifowania

Właściwości eksploatacyjne ściernicy, to cechy, które decydują o przydatności technologicznej tego narzędzia do obróbki ubytkowej, m.in. metali i ceramiki. Właściwości te zależą od charakterystyki technicznej ściernicy (rodzaj spoiwa i ścierniwa oraz ich udział objętościowy) oraz od warunków obróbki. Oba te elementy decydują o tempie zużywania się ściernicy podczas pracy. Podczas szlifowania czynna (robocza) powierzchnia ściernicy (CPS) ulega ciągłym zmianom. Podstawowe przyczyny i skutki zmian stanu czynnej powierzchni ściernicy spowodowane procesami zużycia i zalepiania zostały przedstawione na rysunku 2.1.1 (D11).



Rys. 2.1.1. Podstawowe przyczyny i skutki zmian stanu czynnej powierzchni ściernicy [PliJ1988.3]

Zużycie ściernic to złożony proces fizyko-chemiczny. Przyczynia się on do zmiany wielkości wyjściowych procesu, czyli także rezultatów obróbki. Ponadto, przyjmuje się, że podatność na zużycie determinuje okres trwałości ściernicy oraz jej potencjał skrawny, gdzie trwałość ściernicy określa się sumą czasów jej pracy od chwili rozpoczęcia szlifowania po zabiegu obciągania do chwili, w której ze względu na przyjęte kryterium, uznaje się ją za zużytą.

Podczas obróbki z biegiem czasu następują:

- zużycie ziaren ściernych,
- zużycie spoiwa (pękanie mostków spoiwa),
- zapychanie porów wiórami materiału obrabianego i produktami zużycia.

Objawy te występują w wyniku obciążeń mechanicznych i cieplnych, które z kolei są wynikiem oporów skrawania i tarcia oraz procesów adhezji¹ i dyfuzji² składników ściernicy z cząsteczkami powierzchni obrabianej.



Rys. 2.1.2. Formy zużycia ziaren w ściernicy [PliJ1986]

Objawy zużycia ziaren i spoiwa, to przede wszystkim ich ścieranie oraz wykruszanie. Mostki spoiwa są podatne głównie na pękanie, podczas gdy ziarna ścierne podlegają bardziej złożonemu procesowi zużycia. W tym przypadku rozróżniamy następujące formy zużycia (rys. 2.1.2, D12):

- ścieranie wierzchołków ziaren,
- powierzchniowe mikrowykruszenia,
- wykruszanie większych cząsteczek z powierzchni ziaren (tzw. łupanie),
- wyrywanie ziaren ze spoiwa (związane z pękaniem mostków spoiwa).

Proces zużycia ściernicy przebiega w ustalonych warunkach jako proces ciągły. Zużycie ziaren i wykruszenia spoiwa są procesami współzależnymi, wiec oddziaływają na siebie wzajemnie. Stąd intensywność całkowitego zużycie ściernicy można opisać sumą [Bor1983]:

$$Q = \alpha \cdot Q_{ziaren} + \beta \cdot Q_{spoiwa}, \qquad (2.1.1)$$

gdzie: Q_{ziaren} – intensywność, z jaką przebiega zużycie ziaren ściernych; Q_{spoiwa} – intensywność, z jaką przebiega wykruszanie spoiwa; α , β – to współczynniki wzajemnej interferencji obydwu form zużycia.

Przy czym, na intensywność zużycia ziaren składają się:

- ścierne zużycie ziaren przebiegające z intensywnością (Q_s) ,
- doraźne wykruszanie cząsteczek ziaren przebiegające z intensywnością (Q_d) ,
- zmęczeniowe wykruszanie cząsteczek ziaren przebiegające z intensywnością (Q_z) ,
- termo-zmęczeniowe wykruszanie cząsteczek ziaren przebiegające z intensywnością (Q_t) .

Natomiast w przypadku spoiwa przyjmuje się doraźne pękanie mostków spoiwa przebiegające z intensywnością (Q_w) oraz zmęczeniowe pękanie mostków spoiwa przebiegające z intensywnością (Q_f).

¹ adhezja – przyleganie, łączenie się ze sobą powierzchniowych warstw różnych ciał lub faz (stałych lub ciekłych) wynikające z oddziaływań międzycząsteczkowych [PWN2004].

² dyfuzja – samorzutne wyrównywanie stężeń składników, powodowane bezładnym ruchem cieplnym cząsteczek. Powoduje mieszanie się stykających się ze sobą różnych gazów, cieczy lub ciał stałych [PWN2004].

Stąd intensywność zużycia czynnej powierzchni ściernicy przyjmuje postać [Bor1983]:

$$Q = \alpha \cdot (Q_s + Q_d + Q_z + Q_t) + \beta \cdot (Q_w + Q_f), \qquad (2.1.2)$$

Natomiast współczynniki interferencji zużycia określa się w postaci [Bor1983]:

$$\alpha = 1 - \frac{Q_w + Q_f}{V_{zk} \cdot n_a} \cdot T_n, \ \beta = 1,$$
(2.1.3)

gdzie: V_{zk} – objętość kulistego modelu ziarna ściernego; n_a – ilość ziaren aktywnych znajdujących się na czynnej powierzchni ściernicy; T_n – okres trwałości narzędzia ściernego; β – współczynnik β przyjmuje się równy jedności ze względu na to, że wypadniecie ziarna, bez względu na stopień jego zużycia, spowoduje ubytek ścierniwa w objętości nie większej, niż objętość danego ziarna ściernego.

W pracy [Mar1999] autor zauważa, że utrata zdolności skrawnych ściernicy nie następuje poprzez proces jej zużycia ściernego, czy też wytrzymałościowego ziaren i spoiwa, ale poprzez tępienie się CPS. Przyczyną tego zjawiska jest podatność CPS na zatrzymywanie cząstek materiału szlifowanego w porach ściernicy (wolnej przestrzeni między ziarnami), czy też na powierzchni natarcia ziaren w postaci narostów. Wyjaśnieniem przywarcia narostu (w przypadku obróbki metali) są naciski jednostkowe w strefie kontaktu (około 3 razy większe od granicy plastyczności metalu) oraz wysokie lokalne temperatury (przekraczające temperaturę topnienia metali). Takie warunki powodują, że materiał przywiera do ziaren i szczelnie wypełnia wszystkie zagłębienia i pory (rys. 2.1.3, D13).



Rys. 2.1.3. Schemat powstawania narostu na powierzchni natarcia ziarna (a) oraz rozkład sił (b) przeciwstawiających się wyrywaniu metalu osadzonego we wgłębieniach CPS (c), [Mar1999]

Czynna powierzchnia ściernicy podczas pracy ulega ciągłym zmianom, w związku z postępującym zużyciem ziaren ściernych i mostów spoiwa. Zmiany CPS można rozpatrywać w skali makro lub mikrogeometrii.

Do oceny zmian makrogeometrii można wykorzystać 2 zarysy: obwodowy i osiowy. Mówimy wówczas odpowiednio o zużyciu obwodowym i krawędziowym. Parametry wykorzystywane do oceny zużycia na podstawie profilu obwodowego to: średnie zużycie krawędziowe, średnia wysokość falistości, liczba wierzchołków falistości na obwodzie ściernicy oraz sumaryczna względna długość wierzchołków falistości na poziomie maksymalnych grubości skrawanych jednym ziarnem. Natomiast zużycie krawędziowe opisywane jest poprzez: zużycie promieniowe, długość czynnej krawędzi ściernicy, kąt zużycia krawędziowego i powierzchnię zużycia krawędziowego.

Objawami zmian mikrogeometrii czynnej powierzchni ściernicy są: zmiany kształtu wierzchołków ziaren aktywnych (wynikłe w skutek zużycia ściernego) oraz zmiany położenia wierzchołków ziaren aktywnych (spowodowane procesami zużycia wytrzymałościowego,

które powoduje odkrywanie nowych wierzchołków w wyniku pękania, łupania i wyrywania fragmentów, a nawet całych ziaren). Oceny mikrogeometrii można dokonać poprzez analizę zarysu osiowego CPS. Rodzaj i intensywność zmian powierzchni ściernicy można w sposób ilościowy określić za pomocą parametrów charakteryzujących wielkość powierzchni starcia na wierzchołkach ziaren oraz charakteryzujących rozproszenie ich rzędnych w kierunku promieniowym ściernicy. Do parametrów tych należą głównie: średnia długość odcinków starcia wierzchołków ziaren, sumaryczna względna długość odcinków starcia wierzchołków ziaren, rozproszenie rzędnych (średnia wysokość) wierzchołków ziaren, ilość wierzchołków na długości jednostkowej, średnia odległość wierzchołków ziaren oraz wariancja rzędnych wierzchołków.

2.2. Wpływ zużycia ścienicy na wyniki obróbki i okres jej trwałości

Podstawowe właściwości warstwy wierzchniej, które można opisać za pomocą parametrów to: geometria (w tym mikrogeometria), mikrotwardość (wywołane przez zamiany fazowe w materiale), naprężenia obróbkowe lub zmiany mikrostrukturalne [Kru1994].

Na zmiany chropowatości nakładają się zjawiska związane z niedoskonałością procesu szlifowania oraz niedokładnością ruchu narzędzia względem powierzchni obrabianej, co wywołane jest zużyciem narzędzia i wystąpieniem drgań w układzie OUPN. Natomiast naprężenia spowodowane są przez odkształcenia plastyczne spowodowane wpływami cieplnymi i mechanicznymi. Powyższe aspekty powodują, że sterowanie procesem kształtowania warstwy wierzchniej przedmiotów szlifowanych jest trudne, a najbardziej pożądanym rozwiązaniem tego problemu jest określenie łatwych do pomiaru wskaźników rejestrowanych bez zatrzymywania procesu obróbki (*on-line*), które byłyby silnie skorelowane z właściwościami warstwy wierzchniej. [Kru1994]

Wpływ warunków obróbki na naprężenia w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego, został opisany w wielu pracach naukowo-badawczych. W pracy [KL1991] określono zależność logarytmiczną pozwalającą oszacować naprężenia powstające w trakcie obróbki ściernicami elektrokorundowymi:

$$\sigma = a + b \log K , \qquad (2.2.1)$$

gdzie:

$$K = \frac{a_e \cdot v_s}{v_{fi}} = a_e \cdot q \text{[mm]}.$$
(2.2.2)

Postać parametru *K* wynika z wpływu oddziaływania cieplnego w strefie szlifowania. Maksymalna temperatura szlifowania jest proporcjonalna do mocy i odwrotnie proporcjonalna do prędkości przemieszczania przedmiotu [KL1991]:

$$\Theta = p_s / v_{ft} [W \cdot s / mm], \qquad (2.2.3)$$

a ponieważ moc szlifowania można opisać równaniem:

$$p_s = \frac{v_s^{(2-2f)} \cdot a_e^{-f}}{v_{ft}^{(1-2f)}},$$
(2.2.4)

to w konsekwencji:

$$\Theta = \frac{v_s^{(2-2f)} \cdot a_e^{f}}{v_{ft}^{(2-2f)}}.$$
(2.2.5)

Dodatkowo, w pracy [KW1997] zaproponowano wskaźnik *B*, będący iloczynem gęstości strumienia energii szlifowania i czasu kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym:

$$B = \frac{P_s}{b_{(w)} \cdot v_{fl}} \left[\frac{\mathbf{W} \cdot \mathbf{s}}{\mathbf{mm}^2} \right], \qquad (2.2.6)$$

który z racji wysokiej korelacji może być wykorzystany do oceny szacunkowej naprężeń własnych materiału, bez zatrzymywania procesu obróbki, a w sprzężeniu z układem sterowania parametrami obróbki, także do sterowania ich poziomem.

Jednakże wynik procesu szlifowania, czyli w rozpatrywanym przypadku, charakterystyka powierzchni przedmiotu obrabianego, nie zależy tylko od właściwości materiału przedmiotu obrabianego i od warunków szlifowania, ale także bezpośrednio od chwilowego stanu czynnej powierzchni ściernicy. Oznacza to, że stan warstwy wierzchniej przedmiotu szlifowanego zależy od geometrycznych i energetycznych warunków oddziaływania czynnej powierzchni ściernicy podczas obróbki. Natomiast charakter i intensywność zużycia ściernicy zależy od:

- charakterystyki technicznej ściernicy, w tym od rodzaj spoiwa i ścierniwa oraz ich udziału objętościowego,
- warunków obróbki, czyli nastaw, które decydują o obciążeniu ziaren ściernych i intensywności chłodzenia (wydatków chłodziwa).

Wszystkie te elementy decydują o charakterze i tempie zużycia, które są zmienne w całym przedziale czasu pracy ściernicy i objawiają się zmianami stanu CPS. Natomiast zmienne stany CPS są jednym z czynników wpływających na zmiany wielkości wyjściowych procesu, czyli także na rezultaty obróbki (rys. 2.2.1, D16). Dlatego, też uzyskanie określonych własności fizycznych warstwy wierzchniej szlifowanych przedmiotów, może nie zostać zapewnione poprzez stosowanie jednakowych parametrów szlifowania w cyklu produkcyjnym.

Przyrost długości czynnej krawędzi ściernicy (B_{kr}) powoduje zwiększenie ilości jednocześnie pracujących ziaren, a tym samym wzrost siły skrawania. Powiększenie powierzchni starcia na wierzchołkach ziaren powoduje wzrost wartości składowej normalnej siły szlifowania (F_n), co jest związane ze wzrostem wielkości powierzchni tarcia, a tym samym pracy tarcia. Wzrost pracy tarcia powoduje wzrost ilości ciepła w strefie obróbki oraz lokalny przyrost temperatury powierzchni przedmiotu obrabianego, co w konsekwencji może doprowadzić do przemian strukturalnych w jego warstwie wierzchniej. Objawami tych zjawisk może być wzrost naprężeń, a nawet wystąpienie tzw. przypaleń szlifierskich (odpuszczenie materiału lub wtórne zahartowanie). Zmniejszenie wysokości profilu ściernicy, spowodowane zużyciem ściernym i mikrowyruszeniami, powoduje również zmniejszenie wysokości nierówności na powierzchni obrabianej.

Wpływ geometrycznych skutków zużycia ściernicy na naprężenia w warstwie wierzchniej szlifowanego przedmiotu poruszano w wielu pracach, między innymi [KPP1978, PliS1988] oraz [PP1990], gdzie potwierdzono ścisłą zależność między wartościami i charakterem zmian parametru określającego powierzchnię starcia ziaren ściernicy, a wartościami i charakterem zmian naprężeń ostatecznych w warstwie wierzchniej.



Rys. 2.2.1. Wpływ zmian stanu CPS na właściwości fizyczne warstwy wierzchniej szlifowanego przedmiotu [PP1990]

Wpływ zużycia CPS na wyniki obróbki oraz okres trwałości zdeterminowany jest poprzez właściwości eksploatacyjne ściernicy. Charakteryzują one technologiczną i ekonomiczną jej przydatność do określonej operacji szlifowania, przy jednoczesnym spełnieniu wymagań dotyczących przebiegu i wyników operacji. Podstawowymi wielkościami charakteryzującymi właściwości eksploatacyjne są:

- zdolność skrawna ściernicy,
- trwałość ściernicy (zdolności skrawnej),
- potencjał obróbkowy ściernicy.

Zdolność skrawna ściernicy

Ponieważ wielkości opisujących geometrię CPS jest dużo, ich jednoczesna analiza jest trudna, natomiast na podstawie pojedynczych parametrów, określenie zużycia ściernicy jest zwykle niemożliwe, dlatego kompleksową ocenę zużycia ściernicy i jej zdolności skrawnej można wyrazić za pomocą syntetycznego wskaźnika stanu jej powierzchni, przyjmując jako parametry charakterystyczne te, które posiadają najwyższy stopień korelacji ze zdolnościami skrawnymi. Wskaźniki te charakteryzują technologiczną przydatność ściernicy do zamierzonych efektów obróbki.

Przykładowe wskaźniki oceniające zdolność skrawaną ściernicy zaproponowane w pracy [Kac1985] mają następujące postacie:

$$K_{1} = \left(\frac{Q_{w}}{Q_{s}}\right)_{Q_{w},t}, \quad K_{2} = \left(\frac{Q_{w}}{F_{n},F_{c}}\right)_{Q_{w},t}, \quad (2.2.7, 2.2.8)$$

$$K_{3} = \left(\frac{\underline{Q}_{w}}{R_{a}}\right)_{\underline{Q}_{w},t}, \quad K_{4} = \left(\frac{\underline{Q}_{w}}{\sigma_{max}}\right)_{\underline{Q}_{w},t}, \quad (2.2.9, 2.2.10)$$

$$K_{1,2} = \left(\frac{Q_w^2}{Q_s \cdot F_c}\right)_{Q_w,t}, \quad K_{3,4} = \left(\frac{Q_w}{R_a \cdot \sigma_{max}}\right)_{Q_w,t}.$$
(2.2.11, 2.2.12)

Dla zachowania jednoznaczności oceny zdolności skrawnej ściernic, wartości wielkości wchodzących w skład poszczególnych wskaźników wyznaczane są w odniesieniu do stałych i porównywalnych warunków obróbki (Q_w – objętościowa wydajność szlifowania) lub jedna-kowych czasów pracy ściernicy (t – czas pracy ściernicy).

W artykule [PliJ1988.1] przedstawiono kompleksową oceny właściwości topografii czynnej powierzchni ściernicy, podejmując ocenę zdolności skrawnych ściernicy za pomocą syntetycznego wskaźnika stanu jej powierzchni. Kompleksową ocenę CPS zrealizowano na drodze statystycznych analiz zarysów makro- i mikrogeometrii powierzchni ściernicy. Parametry opisujących stan geometryczny CPS, wyznaczone w określonych chwilach czasu pracy ściernicy, tworzą ciągi liczbowe, których analiza pozwala określić charakter i intensywność zmian CPS podczas szlifowania.

W pracy przedstawiono syntetyczny wskaźnik służący do kompleksowej oceny CPS, przyjmując jako parametry charakterystyczne te, które posiadają najwyższy stopień korelacji ze zdolnościami skrawnymi ściernicy. Ostatecznie, na podstawie analiz teoretycznych i wyników badań przyjęto następującą postać syntetycznego wskaźnika stanu CPS:

$$K_{RPS} = \left[\frac{\pi \cdot d_s \cdot L_{wa}}{l_{st} \cdot B_{kr}}\right]_t, \qquad (2.2.13)$$

który ujmuje w liczniku: średnicę ściernicy (d_s), sumaryczną względną długość wierzchołków falistości (L_{wa}) na poziomie maksymalnych grubości skrawanych jednym ziarnem (a_{zmax}), a w mianowniku: długość czynnej krawędzi ściernicy (B_{kr}) oraz sumaryczną względną długość odcinków starcia wierzchołków (l_{st}).

Przykładowy przebieg takiego wskaźnika dla przebadanych ściernic przedstawiono na rysunku 2.2.2 (D18). Wskaźnik wyraźnie reprezentuje pogarszające się zdolności skrawne ściernic wraz z upływem czasu szlifowania.



Rys. 2.2.2. Przebieg zmian syntetycznego wskaźnika stanu CPS w funkcji czasu szlifowania [PliJ1988.1]

Trwałość zdolności skrawnej CPS

Zachodzący proces zużycia ziaren ściernych i mostków spoiwa, pociąga za sobą zmianę wartości wielkości wyjściowych procesu szlifowania, na ogół w kierunku niekorzystnym dla użytkownika. W przypadku, gdy wielkości wyjściowe, uznane za kryteria trwałości ściernicy, osiągną lub przekroczą wartości dopuszczalne, uznaje się, że ściernica utraciła swoje zdolności skrawne. W zależności od rodzaju operacji szlifierskiej, mogą występować różne kryteria trwałości ściernicy [PliJ1988.3, PC1985, PliJ1984], np.:

- tolerancja wymiarowo-kształtowa przedmiotu obrabianego;
- chropowatość powierzchni szlifowanej lub stan naprężeń maksymalnych w warstwie wierzchniej materiału;
- temperatura szlifowania;
- siła i moc szlifowania, wydajność objętościowa lub powierzchniowa;
- poziom drgań.

W konkretnym przypadku, koniecznym może być spełnienie tylko jednego lub kilku kryteriów jednocześnie. Ponadto w dopuszczalnym obszarze warunków i wyników szlifowania, istotność spełnienia danych kryteriów może być różna w różnych fragmentach tego obszaru.

Nasilenie zmian wielu wielkości wyjściowych procesu może zagrażać jakości przedmiotu szlifowanego. Jednakże obserwacja wielkości wyjściowych procesu może być wykorzystana do wyznaczenia okresu trwałości ściernicy, czyli utraty zdolności skrawnych. W szczególnym przypadku, wielkościami tymi mogą być: składowa normalna siły szlifowania (F_n), chropowatość (R_a) oraz maksymalne wartości naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego (σ_{max}) – rys. 2.2.3 (\Box 19).

Dla wybranych wielkości można określić dopuszczalne wartości (granice), których nie można przekroczyć w procesie. Dla danej ściernicy oraz warunków obróbki, można w ten sposób wyznaczyć trwałość ściernicy, która jest równa najkrótszemu czasowi szlifowania, po którym przynajmniej jedna z rozpatrywanych wielkości osiągnie dopuszczalną wartość. Oznacza to, że kontrola zmian wielkości wyjściowych procesu stwarza możliwość przewidywania właściwości fizycznych warstwy wierzchniej szlifowanego przedmiotu, ewentualne zapewnienie określonych cech w kolejno obrabianych przedmiotach oraz wyznaczenie momentu, w którym należy ściernicę poddać zabiegowi obciągania.



Rys. 2.2.3. Interpretacja graficzna sposobu wyznaczania okresu trwałości ściernicy [PliJ1984]

Potencjał obróbkowy ściernicy

Potencjał obróbkowy ściernicy w okresie jej trwałości wyrazić można za pomocą: objętości zeszlifowanej warstwy powierzchni przedmiotu obrabianego (Q_w), wielkości obrabianej powierzchni ($F_{(w)}$) lub ilością obrobionych przedmiotów ($i_{(w)}$).

2.3. Metody oceny zużycia ściernicy

Obecnie istnieje szereg metod służących do oceny właściwości użytkowych ściernic. Metody te charakteryzują się bezpośrednią lub pośrednią oceną stanu ściernicy (rys. 2.3.1, D20). Obie te formy dzielą się na metody statyczne i dynamiczne, czyli takie, w których dokonuje się oceny z zatrzymaniem lub bez zatrzymania procesu szlifowania.

Metody bezpośrednie opierają się najczęściej na opisie makro- i mikrogeometrii czynnej powierzchni ściernicy oraz zależnościach pomiędzy stanem CPS, a wynikiem oddziaływania tej powierzchni na powierzchnię przedmiotu szlifowanego. Określa się przede wszystkim warunki pracy wierzchołków ziaren, czyli [Urb2002]:

- wysokościowe położenie czynnych krawędzi skrawających,
- odległości pomiędzy wierzchołkami skrawającymi,
- grubość warstwy skrawanej wierzchołkami pracującymi,
- długość styku wierzchołków skrawających z materiałem obrabianym.

Natomiast w metodach pośrednich, wykorzystuje się ocenę wyników szlifowania (zależności pomiędzy stanem CPS a wynikiem oddziaływania tej powierzchni na powierzchnię obrabianą), albo obserwację i analizę zjawisk towarzyszących procesowi obróbki szlifowaniem, których charakter w silny sposób zależy od właściwości badanej ściernicy (rys. 2.3.1, D20).



Rys. 2.3.1. Metody wykorzystywane do oceny geometrii ściernic [Urb2002, Koz1996]

W przypadku diagnozowania użytkowych właściwości ściernic w trakcie procesu szlifowania, najczęściej stosowane są metody pośrednie, czyli skupiające się na rejestracji i analizie zjawisk towarzyszących procesowi obróbki. Mierzalne wielkości oraz zjawiska towarzyszące procesowi szlifowania, to przede wszystkim:

- temperatura powierzchni przedmiotu szlifowanego,
- składowe siły szlifowania,
- wydajność szlifowania,
- chropowatość powierzchni przedmiotu szlifowanego,
- zużycie promieniowe ściernicy,
- sumaryczna powierzchnia starcia CPS w okresie trwałości,
- moc szlifowania,
- drgania w strefie styku,
- sygnał emisji akustycznej.

W artykule [Ina1985] Inasaki zaproponował analizę sygnału akustycznego towarzyszącego zabiegowi obciągania ściernicy (przywracania jej zdolności skrawnych). Badania wykazały przydatność tej metody do analizy przebiegu tego zabiegu. W następnej pracy [Ina1991] autor wykorzystał monitorowanie sygnału emisji akustycznej (EA) i mocy szlifowania w procesie szlifowania otworów, w celu wykrycia przywaleń szlifierskich i nadmiernego zużycia CPS.

Szereg kolejnych prac (m.in.: [WMB1994, WDL1996, LR1993]) potwierdziło pożyteczność analizy sygnału EA, jako narzędzia do kontroli przebiegu procesu. Na przykład w pracy Hasokawy (artykuł [HYU2001]) zastosowano metodę cyfrowego przetwarzania obrazu do analizy zużycia CPS z regularnego azotku boru (CBN). Metodę tą uznano za łatwiejszą i wygodniejszą od metody profilografowania do praktycznej kontroli zużycia ściernicy. W badaniach rejestrowano, także sygnał EA. Sygnał ten, pełniąc funkcję parametru wejściowego jednokierunkowej sieci neuronowej zbudowanej ze 160 neuronów, okazał się najczulszym parametrem do oceny stanu CPS. Więcej informacji o wykorzystaniu sygnału emisji akustycznej do oceny przebiegu procesu szlifowania oraz badania zużycia ściernicy zamieszczono w rozdziale 2.4 niniejszej pracy, który poświęcony jest temu zagadnieniu.

2.4. Zjawisko emisji akustycznej i jej źródła w procesie szlifowania

2.4.1. Emisja akustyczna

Emisja akustyczna (EA) może być rozumiana jako zjawisko fizyczne oraz jako metoda pomiarowa. W pierwszym przypadku mamy do czynienia z wytwarzaniem w ciałach stałych fal sprężystych, które spowodowane są dynamiczną, lokalną przebudową struktury materiału. W przypadku emisji akustycznej, jako metody pomiarowej, fale sprężyste rejestrowane są przez czujnik, a następnie poddawane obróbce elektronicznej w aparaturze pomiarowej uzyskując końcową postać impulsu EA, którego opis jest istotą metody [MO1994].

Emisja akustyczna, powstająca w materiale na skutek zewnętrznego oddziaływania, to proces wytwarzania sygnału akustycznego (dźwięku) w postaci dylatacyjnych³ i ścinających fal sprężystych, propagowanych na całej objętości materiału. Emisja akustyczna towarzyszy bardzo różnorodnym zjawiskom, poczynając od zjawisk zachodzących w skali submikroskopowej, np. dyfuzja atomów na sąsiednie położenie w sieci krystalicznej, a kończąc na procesach w skali makroskopowej (np. katastroficzne zniszczenie) [MO1994].

Sygnał emisji akustycznej stanowi względnie małą część wyzwolonej energii wewnętrznej materiału, ale jest na tyle duży, że jest łatwo mierzalny. Zostaje on wypromieniowany w postaci fali sprężystej, która rozchodzi się w całym badanym ciele od źródła emisji do powierzchni obiektu. Ta cecha EA powoduje, że nie ma specjalnych wymagań dotyczących lokalizacji detektorów emisji [MO1994].



Rys. 2.4.1. Schemat powstawania sygnału emisji akustycznej (fal sprężystych)

Przyczyną wyzwolenia energii jest zadziałanie bodźca zewnętrznego na obiekt. Powoduje on, że pierwotny rozkład energii wewnątrz materiału ulega zmianie i jednocześnie wyzwolona zostaje energia, która zużyta jest na wykonanie lokalnej pracy mechanicznej, zamieniona w ciepło oraz zużyta na wypromieniowanie fali sprężystej (rys. 2.4.1, D21). Bodźcami mogą być procesy mechaniczne, chemiczne, radiacyjne lub zmiana parametrów stanu (temperatury, ciśnienia lub objętości), a materiałem: ciało stałe, ciecz lub substancja gazowa.

Użyteczny zakres częstotliwości sygnałów emisji akustycznej, pochodzącej z odkształceń metali, mieści się w przedziale od 100 kHz do 3 MHz, czyli należy do grupy ultra-

³ dylatacja –rozszerzalność, właściwość polegająca na zwiększaniu się długości lub objętości [PWN2004].

dźwięków $(1,5\cdot10^4 - 10^{13} \text{ MHz})$. Zakresy obserwowalnych zjawisk emisji akustycznej stawione są na rysunku 2.4.2 (\Box 22).



Rys. 2.4.2. Zakresy częstotliwości badań sygnałów emisji akustycznej

W początkowych badaniach (rok 1950) mierzone częstotliwości rzadko przekraczały 20 kHz, czyli mieściły się w zakresie akustycznym (dźwięków słyszalnych), stąd powstał termin *emisji akustycznej*. Jednak w miarę doskonalenia urządzeń pomiarowych zakres ten stopniowo był rozszerzany, najpierw do 1 MHz (rok 1967), następnie do 3 MHz (rok 1969) i do 30 MHz (rok 1971). W związku z tym w niektórych publikacjach zaczęto zastępować termin emisji akustycznej przez *emisję fal naprężeń* (ang.: *Stress Wave Emission – SWE*). Jednakże w większości przypadków pozostano przy nazwie *emisja akustyczna*, którą należy jednak traktować jako nazwę umowną.

Aparatura służąca do rejestracji sygnału emisji akustycznej, to przede wszystkim szerokopasmowy przetwornik piezoelektryczny, który przekształca mikrodrgania o amplitudzie mikrometrów na wielkość elektryczną zwaną sygnałem EA oraz interfejs przeznaczony do współpracy z mikrokomputerem. Przetworniki piezoelektryczne rozwinęły się na przestrzeni lat od czujników jednokanałowych do urządzeń wielokanałowych. Rozszerzono także ich pasmo rejestrowanych częstotliwości z kilkunastu kHz do pasma rzędu 200 – 1000 kHz i więcej.

Kształt i charakter zarejestrowanego przez czujnik sygnału EA zależy od procesów zachodzących w samym źródle sygnału, od właściwości ośrodka (materiału), w którym rozchodzi się sygnał, a także od systemu pomiarowego. Rejestrowany sygnał elektryczny zawiera wiele informacji, w tym informacji zbędnych do przeprowadzenia charakterystyki źródła EA, oraz niecharakteryzujących źródła. Dlatego w celu otrzymania informacji o procesach zachodzących w badanym materiale, wydziela się sygnał emisji akustycznej poprzez wybór i badanie pewnych charakterystycznych parametrów sygnału, których opis w czasie oraz względem innych parametrów zewnętrznych pozwala określić procesy zachodzące w źródle. Aby to uczynić, należy dokonać opisu deskryptorów⁴ badanego sygnału, które są podstawowym elementem analizy emisji akustycznej.

Poniżej zestawiono deskryptory używane do analizy sygnałów emisji akustycznej. W każdej grupie, deskryptory posortowano według zakresu zastosowań (jako pierwsze wymienione są te, których używa się najczęściej) [MO1994]:

⁴ deskryptor – cecha charakterystyczna sygnału, która zawiera najbardziej użyteczne informacje o badanym procesie [PWN2004].

- 1. pochodne zmian w czasie:
- tempo lub suma zliczeń,
- tempo lub suma zdarzeń,
- liczba przejść przez wybrany poziom amplitud,
- 2. pochodne przebiegów czasowych:
- maksymalna amplituda,
- średnia amplituda,
- powierzchnia nad wartością średnią,
- okres półtrwania,
- 3. pochodne energii:
- maksymalna wartość skuteczna sygnału (*RMS_{max}*),
- średnia wartość skuteczna sygnału (*EA_{RMS}*),
- suma rejestrowanych wartości skutecznych EA,
- wskaźniki wierzchołka impulsu,
- energia pojedynczego impulsu lub zdarzenia,
- 4. pochodne rozkładu częstotliwościowego:
- częstotliwość maksymalnej intensywności w widmie mocy,
- częstotliwość środkowa (granica podziału widma mocy na części o równej energii),
- maksymalna intensywność lub wierzchołek o wybranych pasmach częstotliwości,
- średnia częstotliwość w widmie amplitud,
- szerokość pasma częstotliwość sygnałów przekraczających wybrany poziom,
- energia w wybranych pasmach częstotliwości.

Poprawność interpretacji emisji poprzez powyżej omówione deskryptory, zależy w dużym stopniu od warunków rozchodzenia się sygnału EA i zdolności rozdzielczej aparatury. Zasadnicze trudności pojawiają się, gdy emisja dociera do czujnika jednocześnie z różnych źródeł i towarzyszące jej fale sprężyste nakładają się na siebie. Wówczas celowe jest korzystanie z oceny średniej wartości skutecznej emisji [MR2000]. Ponadto, wartość EA_{RMS} jest bezpośrednio związana z energią sygnału elektrycznego (jest całką energii) i stanowi jakościową charakterystykę EA, niezdeformowaną operacją dyskryminacji uzyskaną bez udziału dyskryminatora i praktycznie niezależną od szumów aparatury elektronicznej. Drugą, bardzo ważną cechą EA_{RMS} jest to, że w porównaniu z sumą zliczeń, przy tym samym wzmocnieniu całkowitym, jest znacznie bardziej czuła i szybciej sygnalizuje zachodzące w badanym materiale zjawisko [Pil1991].

2.4.2. Źródła impulsów emisji akustycznej w procesie szlifowania

Podstawowym założeniem w metodach wykorzystujących analizę sygnału emisji akustycznej jest hipoteza, według której sygnały EA zawierają wszystkie niezbędne informacje o mikro- i makrozjawiskach towarzyszących procesowi szlifowania, w tym także informacje o stanie CPS.

Głównym źródłem sygnału AE w procesie szlifowania jest strefa szlifowania. Jako źródło największych odkształceń plastycznych, stanowi obszar badań parametrów przebiegu procesu. Każde ziarno ścierne będące w kontakcie z przedmiotem szlifowanym, wywołuje eksplozję impulsu AE, który rozchodzi się poprzez ściernicę oraz odkształcenia plastyczne w materiale.

Wyzwolenie zgromadzonej w materiale energii następuje w wyniku zadziałania bodźca zewnętrznego, którym mogą być [PliS1999, HLR1994]:

- odkształcenia plastyczne ruch dyslokacji, pełzanie dyfuzyjne, poślizg na granicach ziaren i bliźniakowanie,
- powstawanie i wzrost pęknięć i mikropęknięć w materiałach poddawanych działaniu naprężeń (wraz z procesem zniszczenia),
- przemiany fazowe,
- wzajemne przemieszczanie się fragmentów badanego ośrodka połączone z tarciem,
- zjawiska zużycia ściernicy:
 - ścieranie wierzchołków ziaren,
 - powierzchniowe mikrowykruszenia,
 - wykruszanie większych cząsteczek z powierzchni ziaren (tzw. łupanie),
 - wyrywanie ziaren ze spoiwa (połączone z pękaniem spoiwa).



Rys. 2.4.3. Źródła emisji akustycznej w procesie szlifowania [HLR1994]

Należy tu zauważyć, że zjawiska będące źródłem emisji akustycznej zachodzą w przedmiotach szlifowanych w łącznym zakresie lub z dominacją jednego z nich, w skali submikro-, mikro- lub makroskopowej, zależnie od parametrów obróbki, twardości narzędzia i jego zdolności skrawnych oraz od rodzaju materiału obrabianego. Główne rodzaje źródeł EA w procesie szlifowania przedstawiono na rysunku 2.4.3 (D24).

Analizując pochodzenie sygnału EA od strony przedmiotu obrabianego, należy zauważyć, że przy dużych obciążeniach zewnętrznych materiału, z jednej strony rośnie prędkość ruchu powstających dyslokacji (nawet do prędkości dźwięku w danym materiale, np. dla metalu około 4000 m/s), a z drugiej strony następuje ich wyhamowywanie, powodujące wzrost energii kinetycznej w kwadracie prędkości. Energia ta, przekazana atomom w sieci krystalograficznej materiału, zwiększa amplitudę ich drgań, emitując jednocześnie falę sprężystą, której sygnał jest odbierany w postaci impulsów EA. Zatem rejestrowane impulsy EA podczas pracy zarówno pojedynczego ziarna ściernego, jak i całej ściernicy są miarą odkształceń plastycznych powstałych w warstwie wierzchniej obrabianego materiału i pracy włożonej na ich konstytuowanie [PliS1999].

Metale i ich stopy charakteryzują się polimorfizmem⁵ i w zależności od temperatury oraz ciśnienia występują w różnych odmianach krystalicznych o różnych rodzajach sieci. Przemianom alotropowym⁶ towarzyszą zmiany mechaniczne i fizyczne, co związane jest z wystąpieniem źródła sygnału emisji akustycznej, szczególnie podczas szybkiej przemiany martenzytycznej (przechłodzenie austenitu podczas szybkiego chłodzenia stopu, zwykle w temp. 100 – 350 °C). Przemiana ta polega na poślizgowym przemieszczaniu się grup atomów. Proces taki, po zainicjowaniu, przebiega z prędkością dźwięku i jest hamowany na granicach faz lub innych barierach energetycznych. Takie gwałtowne zmiany kształtu i związane z tym wytworzenie naprężeń powoduje powstanie fali sprężystej, czyli jest źródłem EA. Natomiast powolne przemiany fazowe zachodzące w wyniku dyfuzyjnych przemieszczeń atomów, nie wywołują efektów akustycznych mieszczących się w ich praktycznym zakresie rejestracji.

W odróżnieniu od odkształceń plastycznych (ruchu dyslokacji) występujących samodzielnie, powstanie i wzrost mikropęknięć charakteryzuje się występowaniem silnego sygnału emisji akustycznej. Najsilniejszy sygnał rejestrowany jest w przypadku pękania rozdzielczego oraz szybkiego wzrostu mikropęknięć [Pil1994].

2.5. Wykorzystanie emisji akustycznej do oceny procesu szlifowania

Metoda analizy sygnału EA jest jednym z najnowszych sposobów monitorowania procesu szlifowania. Spośród dotychczasowych metod, niesie ona najwięcej najbardziej istotnych informacji o zjawiskach zachodzących w strefie szlifowania. Właśnie w tej metodzie, w ostatnim okresie czasu, pokłada się największe nadzieje w odniesieniu do szeroko rozumianego monitorowania procesu szlifowania.

Poza tym, przyczyny rozwoju tej metody wynikają z istoty samego zjawiska i zalet technicznych metody. Sygnały EA zawierają m.in. informacje o początkowym stadium zmian struktury materiału, niedającym się zaobserwować innymi sposobami. EA staje się jednym z narzędzi współczesnej techniki i badań naukowych stosowanych do nieniszczących badań procesów i ich wyników.

W przypadku procesu szlifowania, sygnał EA ujmuje globalnie zjawiska zarówno od strony narzędzia, jak i od strony przedmiotu. W szczególności informuje o wielkości i charakterze odkształceń wynikających z warunków obróbki oraz ze stanu zużycia ściernicy. Pozwala tym samym, na obserwacje sygnałów pochodzących z całego obiektu, a nie tylko z jego powierzchni oraz na monitorowanie aktywnego źródła fali akustycznej, więc jego lokalizacja jest łatwiejsza. Kolejnym atutem przemawiającym na korzyść opisywanej metody jest aparatura pomiarowa, która jest stosunkowo łatwa w produkcji i obsłudze.

⁵ polimorfizm – wielopostaciowość, występowanie tej samej substancji (o tym samym składzie chemicznym) w kilku odmianach krystalicznych, różniących się budową wewnętrzną, postaciami krystalograficznymi, właściwościami fizycznymi i niektórymi właściwościami chemicznymi [PWN2004].

⁶ alotropia – występowanie tego samego pierwiastka chemicznego w 2. lub więcej odmianach (w tym samym stanie skupienia) mających różne właściwości fizyczne i chemiczne. Przemiana alotropowa to przejście jednej postaci alotropowej pierwiastka chemicznego w inną. Zachodzi najczęściej w wyniku ogrzewania lub zmiany ciśnienia [PWN2004].

Badania nad zastosowaniem emisji akustycznej, jako metody pomiarowej w procesie szlifowania, obejmują szeroki obszar zagadnień i problemów związanych z jego przebiegiem. Najczęściej diagnozowane problemy związane z procesem szlifowania oraz metody ich monitorowania ujęto szeroko w pracach [GD2001] oraz [OD2001]. Badania prowadzi się w szerokim zakresie: od wykrywania kontaktu ściernicy z przedmiotem szlifowanym, czy też wykrywania kolizji, poprzez zjawiska związane pracą ściernicy do oceny drgań, wibracji, czy też deformacji układów obrabiarki (rys. 2.5.1, D26).



Rys. 2.5.1. Wybrane problemy związane z monitorowaniem szlifowania oraz stan badań i zastosowań przemysłowych emisji akustycznej [GD2001]

Najnowsze trendy zastosowania EA w ocenie procesu szlifowania, to ocena zużycia ściernicy oraz ocena parametrów stanu powierzchni obrabianej (chropowatość, naprężenia, przypalenia itp.). Przeprowadzone do tej pory w Politechnice Koszalińskiej oraz kilku innych ośrodkach badawczych, badania rozpoznawcze wskazują na możliwość wykorzystania EA, jako metody pomiarowej w tym obszarze zagadnień.

Istotne obszary badań wykorzystujących metodę pomiarową emisji akustycznej do oceny okresu trwałości i aspektów związanych ze zużyciem ściernicy (w tym wyników obróbki) w skróconej formie zestawiano poniżej.

2.5.1. Badanie zużycia ściernicy

Pierwszą pracą odnoszącą się do zużycia ściernicy i metody EA, zastosowanej jako narzędzie pomiarowe, jest praca z roku 1984. Autorzy pracy [DH1984] podjęli próbę oceny EA, jako narzędzia do pomiarów zużycia i obciążenia ściernicy w procesie szlifowania płaszczyzn oraz do wykrywania zjawiska wyiskrzania, czyli utraty kontaktu ściernica - przedmiot obrabiany. Zarejestrowane podczas badań zmiany średnich wartości RMS w funkcji czasu pracy ściernicy (rys. 2.5.2, D27) świadczą o tym, że wartość skuteczna EA posiada korelację ze zużyciem narzędzia. Autorzy zauważyli, że wartość ta wykazała podobny charakter do zmian wartości składowych siły szlifowania. Badania te jednak, co podkreślali autorzy, nie stanowiły próby odróżnienia pomiędzy wpływem zużycia ściernicy, a obciążeniem w strefie szlifowania na postać sygnału EA.



Rys. 2.5.2. Zmiany średnich wartości EA_{RMS} w funkcji czasu pracy ściernicy ($a_e = 7,63 \mu m$) [DH1984]

Interesujące zastosowanie sygnału EA, jako narzędzia pomiarowego zaprezentowano w pracy [GD1994], która poświęcona była badaniu zużycia promieniowego ściernicy. Autorzy przedstawili metodę badania zużycia promieniowego ściernicy opartą na wykorzystaniu obciągacza, jako sensora zmian makrogeometrii. Obciągacz, jako sonda wchodził w interakcje z czynną powierzchną ściernicy będącą w ruchu. W pracy zaprezentowano także bardzo szczegółową analizę wzajemnego oddziaływania zachodzącą pomiędzy obciągaczem, a powierzchnią ściernicy. Zaobserwowano 3 poziomy interakcji: turbulencje, interakcja sprężysta (na tym poziomie kontaktu powierzchnia ściernicy nie ulega zniszczeniu) oraz interakcja krucha.



Rys. 2.5.3. Zmiany (*EA_{RMS}*) podczas interakcji obciągacza z powierzchnią ściernicy [GD1994]

Z wyników badań przedstawionych w pracy [GD1994] wynika, że kiedy ostrze obciągacza wchodzi w warstwę graniczną powierza i chłodziwa, które otaczają CPS, sygnał EA_{RMS} wzrasta. Wywołane to jest przez falę uderzeniową, która powstaje w wyniku turbulentnego przepływu powierza i chłodziwa w szczelinie pomiędzy ostrzem obciągacza, a powierzchnią ściernicy (obszar A na rys. 2.5.3, D27). Kiedy obciągacz dociera do powierzchni ściernicy, wchodzi w interakcję z najwyżej położonymi ziarna mi ściernymi. W początkowej fazie tego kontaktu (obszar B) zachodzą jedynie sprężyste deformacje, takie jak poślizgi i tarcie. Jeżeli obciągacz zostanie wycofany z tego punktu, nie powinny wystąpić żadne zmiany na powierzchni ściernicy. Punkt, w którym ziarna zaczynają ulegać pęknięciom (obszar C), co wiąże się z wytrzymałościowym zużyciem ściernicy, znajduje się zaraz za "wirtualną granicą głębokości". Granica ta stanowi maksymalną głębokość, która może być wykorzystana do pomiarów średnicy ściernicy.

Powyższe wyniki badań wykazały, że pomiary interakcji narzędzia obciągającego z powierzchnią ściernicy pozwalają na wyznaczenie zmian promienia ściernicy przy użyciu metody pomiaru EA.

W pracy [LL2000] przedstawiono wyniki badań nad zastosowaniem pomiarów emisji akustycznej do diagnostyki procesu szlifowania kłowego wałków, stosując do opisu zdolności skrawnych ściernicy wartość skuteczną sygnału (EA_{RMS}) oraz analizę częstotliwościową nieprzetworzonego sygnału EA. Celem badań było głownie sprawdzenie przydatności wartości RMS do oceny zużycia ściernicy.

Analizę zmian i zależności wartości skutecznej (EA_{RMS}) oparto o charakterystykę częstotliwościową oraz parametry statystyczne sygnału. Analiza w domenie częstotliwości wykazała wzrost wartości amplitudy dla ściernicy zużytej, jednakże wzrost ten jest trudniej obserwowalny, niż w przypadku nieprzetworzonego sygnału EA. Natomiast analiza statystyczna sygnału EA_{RMS} w postaci wariancji i odchylenia standardowego wykazała, że parametr ten może być bardzo dobrym miernikiem zużycia narzędzia, choć zauważono tu, że korelacja jest zależna od prędkości posuwu wgłębnego (obciążenia w strefie) i maleje ze zmniejszeniem tej prędkości (rys. 2.5.4, \Box 28).



Rys. 2.5.4. Zarejestrowane zmiany wariancji (a) i odchylenia standardowego (b) wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej (EA_{RMS}) w funkcji zużycia ściernicy [LL2000]

Autorzy zwracają uwagę, że analiza zmian EA_{RMS} może być użyteczna do oceny zużycia ściernicy tylko wówczas, gdy proces zachodzi bez zjawiska samoostrzenia, ale za to deskryptor ten zawsze powinien być użyteczny do wykrycia tego zjawiska.

W pracach [HLR1994, BPH1990, PliS1998.1, PliS1998.2] oraz [PliS1999] przedstawiono wyniki badań związanych z identyfikacją zużycia pojedynczych ziaren ściernych podczas mikroskrawania z wykorzystaniem metody emisji akustycznej. Analiza danych uzyskanych z doświadczeń przeprowadzonych dla pojedynczych ziaren, udowodniła, że różne zjawiska towarzyszące zużyciu ziarna ściernego są wyraźnie rozróżnialne dzięki ich niepowtarzalnym sygnaturom w zakresie przebadanych częstotliwości. Jednakże badania dla realnego procesu szlifowania, który charakteryzował się częstszym kontaktem ziaren ściernych z powierzchnią przedmiotu obrabianego powodował, że sygnały EA pochodzące od pojedynczych ziaren ściernych nakładały się na siebie. Dopiero odpowiednio przyjęta strategia postępowania (m.in. transformacja odpowiednio dobranych odcinków danych z domeny czasowej do domeny częstotliwości z wykorzystaniem okna *Hamminga* i przekształceń *Fouriera*), polegająca na rozdziale zarejestrowanego sygnału, pozwoliła na opis parametrów kilku niezależnych źródeł EA.

Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowana metoda emisji akustycznej EA, pozwala wyróżnić rodzaj i stopień zużycia ziaren ściernych podczas skrawania. Odmienny charakter sygnałów emisji akustycznej, jak i znaczny przyrost wartości skutecznych RMS, występują w przypadkach kruchego pękania ziarna i mikrowykruszania wierzchołków. Natomiast w przypadku zużycia ściernego ziaren ściernych, wartość skuteczna emisji akustycznej EA_{RMS} występuje w kilkukrotnie niższym zakresie wartości. Wyniki badań wykazały również odmienność charakteru rejestrowanych wartości skutecznych RMS, w zależności od twardości materiału skrawanego oraz rodzaju ziarna ściernego.

2.5.2. Wykrywanie przypaleń i innych wad przedmiotu obrabianego

Przypalenia, pojawiające się w procesie szlifowania, zasadniczo są rodzajem nieodwracalnych zmian w mikrostrukturze warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego. Pojawiają się w momencie długotrwałego działania wysokiej temperatury w strefie szlifowania. Wizualne obserwacje przypaleń, związane są z kolorem bardzo ciemnej warstwy tlenków na powierzchni przedmiotu. Warstwa taka składa się z tlenków: Fe₂O₃, Fe₃O₄ i FeO. Na początku powstawania przypaleń, siła szlifowania i intensywność zużycia ściernicy rosną gwałtownie, a chropowatość powierzchni ulega pogorszeniu.

Wraz ze wzrostem zużycia ściernicy i pojawianiem się przypaleń na powierzchni przedmiotu obrabianego maleje moc sygnału EA o częstotliwości około 10 kHz (A), zaś moc sygnału w paśmie 100 – 300 kHz (B) rośnie. Stosunek tych dwu sygnałów (A/B) wykazuje dobrą korelacją z powiększającymi się przypaleniami przedmiotu, co umożliwiło wykrywanie tych przypaleń [EK1984].

Z kolei pojawiające się wraz ze wzrostem zużycia ściernicy pęknięcia termiczne powierzchni szlifowanej powodują występowanie znacznych impulsów EA w paśmie 600 – – 800 kHz. Występują one zarówno podczas szlifowania jak i bezpośrednio po wyjściu ściernicy z kontaktu z przedmiotem obrabianym. Umożliwia to odrzucenie przedmiotów z wadami powierzchni oraz racjonalny dobór warunków szlifowania [EK1985].

Interesujące podejście do problemu wykrywania przypaleń powierzchni przedmiotu przedstawiono w pracy [WW2001]. Autorzy przedstawili metodę detekcji przypaleń szlifierskich w oparciu o analizę sygnału EA i sztuczne sieci neuronowe (SSN). W artykule przedstawiono wyniki trenowania i testowania SSN, której zadaniem była identyfikacja przypaleń powierzchni obrabianej powstających przy nieprawidłowych warunkach szlifowania. Z przeprowadzonych analiz nieprzetworzonego sygnału EA wynikało, że do detekcji przypaleń nie nadaje się lub posiada ograniczoną skuteczność większość analizowanych wielkości, oprócz parametrów "*power-law*" i "*CFAR power-law*" (ang.: *constant false alarm rate*). Przykładowe zmienności obu wskaźników przedstawiono na rys. 2.5.5 (D30).



Rys. 2.5.5. Zmiany parametrów *power-Law* i *CFAR power-law* w funkcji czasu dla 3 różnych $(0,5; 2,5; \infty)$ wartości wykładnika (v) [WW2001]

Kształt zarejestrowanych zmienności, świadczy o tym, że opisywane współczynniki stanowią efektywną metodą do wykrywania przypaleń, przy czym obszar przypaleń identyfikują pionowe przerywane linie umieszczone na wykresie.

Poza powyższymi wskaźnikami, analiza zmian parametru kurtoza $K(EA_{RAW})$ wykazała, że charakterystyka sygnału EA jest powiązana z profilem powierzchni przedmiotu obrabianego. Oznacza to, że kształt dystrybuanty prawdopodobieństwa rozkładu sygnału może odgrywać główną rolę w odkrywaniu zmian w procesie obróbki powierzchni (np. wynikłych ze zużycia narzędzia).



Rys. 2.5.6. Zależności pomiędzy zmianami chropowatości powierzchni obrabianej, a przypaleniami (A) lub drganiami (B) w funkcji liczby obrobionych elementów [KS2001]

W pracy [KS2001] sygnał EA był rejestrowany w celu określenia zależności pomiędzy "problemami" szlifowania, a charakterem zmian w sygnale. Jako "problemy", uznano przypalenia powierzchni obrabianej, które związane są z grubością warstwy tlenków i generalnie pogarszają jakość wyrobu oraz drgania, które prowadzą do falistości powierzchni – a są wynikiem niepożądanego ruchu powierzchni ściernicy względem powierzchni obrabianej. W rezultacie tego ruchu, powierzchnia traci swoją integralność, a w niektórych przypadkach ulega nawet zniszczeniu. Dodatkowo zwiększające się siły szlifowania, związane z tymi drganiami, prowadzą do przyspieszonego zużycia ściernicy.

Podczas obróbki w ustabilizowanych warunkach szlifowania, chropowatość powierzchni rośnie umiarkowanie. Jednakże, gdy pojawiają się przypalenia lub drgania, rośnie ona gwałtowanie. Na rysunku 2.5.6 (D30) przedstawiono zarejestrowane zmiany chropowatości powierzchni w funkcji liczby obrobionych elementów. Podczas obróbki we względnie optymalnych warunkach szlifowania, chropowatość powierzchni rośnie umiarkowanie. Jednakże, gdy pojawiają się przypalenia (punkt A) lub drgania (punkt B), wzrasta ona gwałtownie.



Rys. 2.5.7. Zmiany wybranych parametrów: *EA_{RMS}* (a), FFT (b), odchylenie standardowe (c), suma zdarzeń (d) sygnału EA w funkcji liczby obrobionych elementów [KS2001]

Autorzy powołując się na dowody świadczące o tym, że sygnał EA generowany podczas procesu szlifowania zawiera informacje silnie powiązane ze zmianami warunków występujących w procesie, zastosowali sygnał EA do detekcji drgań i przypaleń w procesie wgłębnego szlifowania wałków. W tym celu nieprzetworzony sygnał EA poddano obróbce uzyskując wartość skuteczną sygnału (EA_{RMS}), zliczenia zdarzeń, odchylenie standardowe oraz postać po przekształceniu FFT (*Fast Fourier Transformation* – szybka transformata *Fouriera*). Przykładowe wyniki pomiarów sygnału EA przedstawiono na rysunku 2.5.7 (\Box 31). Amplitudy sygnałów wzrastają wyraźnie wraz z ilością obrobionych elementów. Rezultaty analiz ewidentnie świadczą o zmianie warunków pracy ściernicy. W wyniku przeprowadzonych doświadczeń, autorzy doszli do wniosku, że parametry sygnału EA (EA_{RMS} , FFT, suma zdarzeń, odchylenie standardowe) posiadają korelację ze zmianami warunków szlifowania, a ich amplitudy rosną nieliniowo wraz z pojawieniem się przypaleń lub drgań w strefie szlifowania.

W pracy [WMB1994] przedstawiono wyniki badań nad zastosowaniem pomiarów emisji akustycznej w procesie szlifowania, które obejmowały dwa ważne zagadnienia: wyznaczanie stanów przejściowych, które zachodzą w procesie, w tym wyznaczanie pierwszego kontaktu narzędzia z przedmiotem obrabianym oraz chropowatości powierzchni obrabianej i wykrywanie wystąpienia przypaleń szlifierskich. Wykazano przewagę metody pomiaru sygnału EA nad metodą opartą na pomiarach siły szlifowania do wykrywaniu momentu, w którym następuje pierwszy kontakt ściernicy z materiałem obrabianym. Wartości sygnału EA_{RAW} i EA_{RMS} wykazały wyraźny wzrost swoich wartości przy wejściu oraz wyjściu narzędzia z powierzchni przedmiotu szlifowanego, czyli w momencie zainicjowania kontaktu ściernicy z przedmiotem i na zakończenie tego kontaktu (rys. 2.5.8, \Box 32).



Rys. 2.5.8. Wartość skuteczna sygnał EA rejestrowana na powierzchni próbki podczas obróbki [WMB1994]

Autorzy zwracają uwagę, że skuteczność i łatwość zastosowania pomiarów EA do wykrywania kontaktu, zaowocowała już opracowaniem handlowych wersji układów pomiarowych, wykorzystujących deskryptor RMS do wyznaczania momentu, w którym zainicjowany zostaje kontakt pomiędzy narzędziem, a materiałem obrabianym dla procesów obróbki skrawaniem.

Stosunek wartości składowej normalnej siły (F_n) do wartości sygnału emisji akustycznej wyrażonej w postaci wartości skutecznej (EA_{RMS}), wykazał dobrą korelację z chropowatością powierzchni przedmiotu obrabianego. Autorzy tłumaczą istnienie tej relacji ze względu na pojawienie się największej wartość sygnału RMS na wejściu ściernicy w przedmiot szlifowany, gdzie energia właściwa szlifowania jest najmniejsza (ostre ziarna i małe przekroje skrawane), a to oznacza, że istnieje związek pomiędzy stosunkiem wartości (F_n/EA_{RMS}), a wartością energii właściwej. Gdy ściernica ulega zużyciu, wartość energii właściwej szlifowania wzrasta, a chropowatość powierzchni obrabianej maleje. Stad też, wartość zależności (F_n/EA_{RMS}) musi ulec zmianie wraz ze zmianami chropowatości powierzchni (niezależnie od przyczyn). Zależność przedstawiona na wykresie (rys. 2.5.9, \square 33), wyznaczona doświadczalnie, wskazuje na możliwość użycia metody pomiaru emisji akustycznej do szacowania chropowatości powierzchni.



Rys. 2.5.9. Korelacja stosunku (F_n/EA_{RMS}) z chropowatością powierzchni [WMB1994]

Ponadto, w artykule [WMB1994] zaprezentowano wyniki badań odnośnie wykrywania przypaleń szlifierskich w oparciu o analizę sygnału EA. Wystąpienie przypaleń powierzchni przedmiotu szlifowanego może być powiązane ze średnim poziomem wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej (EA_{RMS}).



Rys. 2.5.10. Przykładowy przebieg sygnału EA i jego przetworzonych wartości (b) oraz porównanie wartości (EA_{RMS}) dla próbek z przypaleniami i bez przypaleń (a) [WMB1994]

W przypadku obróbki przedmiotu w warunkach powodujących wystąpienie przypaleń, co przedstawiono na rysunku 2.5.10a (\Box 33), nastąpił wyraźny wzrost wartości skutecznej sygnału (*EA_{RMS}*).

Autorzy poddali analizie także parametr koncentracji sygnału EA, dla którego wykazali szereg zalet, porównując go głównie z deskryptorem RMS. Parametr ten został uznany za wielkość bardziej przydatną do przeprowadzania analiz podczas wykrywania w strefie szlifowania zdarzeń o charakterze impulsowym. Wielkość tą definiuje się jako [WMB1994]:

$$K = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^4}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2\right)^2}.$$
(2.5.1)

Na rysunku 2.5.10b (D33) porównano charakter zmian nieprzetworzonego sygnału EA, wartości RMS oraz parametru kurtoza. Zdarzenia o charakterze przejściowym (impulsowym) są najwyraźniej widoczne dla omawianego parametru.

W pracach [DP1999, PliS2002] podjęto próbę dokonania oceny stanu naprężeń w warstwie wierzchniej szlifowanego przedmiotu metodą pomiaru wartości skutecznej emisji akustycznej (EA_{RMS}). Analiza wyników badań wykazała, że parametry sygnałów emisji akustycznej emitowanej w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego są bardziej czułymi wskaźnikami oceniającymi zachodzące w niej zmiany, w porównaniu ze składowymi siły szlifowania (rys. 2.5.11, \Box 34).



Rys. 2.5.11. Zależności składowych siły szlifowania (F_c , F_n), wartości skutecznej EA (EA_{RMS}) i energii sygnału EA (E_{EA}) od naprężeń własnych w warstwie wierzchniej (σ_{max}) dla $a_e = 0,02$ mm, $v_{ft} = 0,29$ m/s [DP1999]

Wykazane korelacje $(EA_{RMS} = f(\sigma_{max}))$ i energii sygnału $(E_{EA} = f(\sigma_{max}))$ mogą stanowić podstawy do prognozowania naprężeń oraz stwarzają możliwość lepszej oceny procesów zachodzących w strefie szlifowania, a tym samym, na konstytuowanie się właściwości warstwy wierzchniej. Również dobrą korelację zaobserwowano pomiędzy wartością skuteczną (EA_{RMS}) i energią sygnału (E_{EA}) , a chropowatością powierzchni szlifowanej (R_a) , czego nie wykazano w odniesieniu do składowych siły szlifowania $(F_c i F_n)$. Oznacza to, że w badanym przedziale czasu pracy ściernicy, warunki pracy wpływały bardziej jednoznacznie na rejestrowane impulsy emisji akustycznej.

Autorzy na podstawie uzyskanych wyników badań podają także, że na charakter i stopień korelacji pomiędzy średnią wartością skuteczną (EA_{RMS}) i energią tego sygnału (E_{EA}), a maksymalną wartością naprężeń ściskających (σ_{max}) w warstwie wierzchniej wpływ ma obciążenie ziarna w strefie szlifowania. Wielkość sygnału EA w dużym stopniu zależała od przekroju warstw skrawanych poszczególnymi ziarnami. Z kolei na wielkość tego przekroju wpływ miały rodzaj i charakter zużycia ściernicy, tj: ilości ziaren w strefie szlifowania oraz aktualny kształt ich wierzchołków.

2.5.3. Ocena okresu trwałości ściernicy

W pracy [LPG1989] zaprezentowano wyniki badań przeprowadzonych przez Uniwersytet Techniczny w Magdeburgu (Niemcy), dotyczących odzwierciedlenia zmian w stanie narzędzi skrawających w przebiegach rejestrowanego sygnału EA. Badania obejmowały proces toczenia, frezowania, wiercenia oraz szlifowania. W przypadku procesu szlifowania, możliwości wykorzystania pomiaru emisji akustycznej do nadzorowania ściernic przebadano dla przypadku szlifowania wgłębnego wątków. Celem zasadniczym badań było rozpoznawanie końca okresu trwałości narzędzia w zależności od wymaganej jakości powierzchni przedmiotu obrabianego. Celem było ustalenie poziomu sygnału EA, przy którym proces szlifowania byłby jeszcze stabilny (tzn. wolny od drgań samowzbudnych), a odpowiednia jakość powierzchni przedmiotu obrabianego jeszcze zapewniona.



Rys. 2.5.12. Strategia przetwarzania sygnałów do nadzorowania stan ściernicy [LPG1989]

W miarę upływu czasu pracy ściernicy, stwierdzono przyrost amplitudy sygnału EA oraz wzrost stopnia zużycia ściernicy i będące jego konsekwencją pogorszenie jakości powierzchni przedmiotu. Do nadzorowania stanu stępienia ściernicy opracowano oryginalną strategię przetwarzania sygnałów, w której nadzorowane są równocześnie dwa sygnały w różnych pasmach częstotliwości.

Z analizy częstotliwościowej wynikało, że wpływ zużycia na amplitudy sygnału jest bardzo różny w różnych zakresach częstotliwości. Stąd kontrolowanie dwóch pasm zamiast jednego. Przeprowadzone badania wykazały, że sygnały w paśmie 8 – 300 Hz są w przybliżeniu niezależne od zużycia ściernicy i w związku z tym mogą być wykorzystane w charakterze tzw. "ruchomego progu". W przeciwieństwie do pasma częstotliwości 300 – 1200 Hz, gdzie stwierdzono wyraźny wzrost amplitud w miarę postępującego tępienia ściernicy. Autorzy stwierdzili, że mierząc sygnał użyteczny i sygnał progowy można ustalić punkt przecięcia ich przebiegów w czasie, który to wyznacza okres trwałości ściernicy (rys. 2.5.12, \square 35).

W pracach [PD1999, PliS2002] zbadano możliwość monitorowania procesu szlifowania z wykorzystaniem sygnału EA. Ponieważ obróbka szlifowaniem cechuje się dużą losowością, co wymaga szczególnej znajomości fizykalnych podstaw przebiegu procesu oraz korelacyjnych zależności parametrów wykorzystywanych w nadzorowaniu stanu ściernicy i przedmiotu obrabianego, wyniki badań zawierały zależności pomiędzy parametrami sygnału EA (wartością skuteczną EA_{RMS} oraz energią sygnału emisji akustycznej E_{EA}), a parametrami makrogeometrii czynnej powierzchni ściernicy i chropowatością powierzchni (wyrażoną parametrem R_a). Relację między parametrami opisującymi makrogeometrię czynnej powierzchni ściernicy (H_s – średnia wysokość wierzchołków, b_d – szerokość czynna ściernicy, z_a – ilość ziaren aktywnych w przekroju osiowym) przedstawiono na rys. 2.5.13 (D36). Zaprezentowane wyniki badań szlifowania ściernicą z monokrystalicznego azotku boru wykazały, że parametry sygnał emisji akustycznej (EA_{RMS}) jest dogodną wielkością do monitorowania procesu. Najbardziej jednoznaczne wyniki uzyskano dla korelacji średniej wysokości wierzchołków z rejestrowanymi sygnałami. Wraz z jej zmniejszeniem, rośnie wartość skuteczna mierzonego sygnału EA_{RMS} i jego energia (E_{EA}) oraz składowa styczna siły szlifowania (F_c). Przedstawione zależności odnoszą się do okresu ustabilizowanej pracy ściernicy, ale równocześnie dają podstawy do kontynuowania badań w zakresie dłuższych okresów pracy ściernic [PD1999].



Rys. 2.5.13. Zależności pomiędzy wartością skuteczną EA (EA_{RMS}) i składowymi siły szlifowania (F_c , F_n), a parametrami oceny czynnej powierzchni ściernicy [PD1999]

W pracy [Rol1998] dokonano porównania różnych metod oceny okresu trwałości zdolności skrawnej ściernicy wykorzystujących wybrane metody sztucznej inteligencji. Pod uwagę wzięto analizę danych z wykorzystaniem teorii zbiorów przybliżonych. Klasyfikację zużycia ściernicy wykonano przy użyciu sztucznych sieci neuronowych oraz systemu informacyjnego z atrybutami rozmytymi. Wyniki badań wykazały, że istnieje możliwość zbudowania na podstawie danych ze strefy obróbki można zbudować klasyfikator zużycia ściernicy, który przybiera dwa binarne stany: 0 – dla ściernicy ostrej, 1 – dla ściernicy zużytej.

W przypadku analizy działania sztucznej sieci neuronowej otrzymano wysoką jakość aproksymacji danych (blisko 90%), co oznacza, że wytrenowana sieć neuronowa o zadanej strukturze była dobrym klasyfikatorem stanu zużycia ściernicy. Jednakże po wprowadzeniu trzeciego (pośredniego) stanu informującego o zbliżaniu się do momentu obciągania ściernicy, jakość rozpoznawania stopnia zużycia CPS przez sztuczne sieci neuronowe nie była już tak wysoka i wynosiła zaledwie 61%.
W przypadku zaproponowanego systemu informacyjnego opartego na logice rozmytej, wyniki analiz tablicy decyzyjnej z atrybutami rozmytymi, potwierdziły duże znaczenie rejestracji i interpretacji wartości siły szlifowania oraz emisji akustycznej dla zadania klasyfikacji. Maksymalna wartość uogólnionej jakości aproksymacji zaproponowanego sytemu wynosiła 0,82, co nie jest wartością wystarczającą w warunkach produkcyjnych, szczególnie, że autor w badaniach wyjście sytemu ograniczył jedynie do stanu logicznego: prawda (ściernica zużyta) lub fałsz (ściernica ostra).

Kolejna praca [RLL2000] dotyczyła neuronowego systemu diagnostyki ściernicy. W ramach tej pracy zaproponowano neuronowy system diagnostyki ściernicy, którego wektor wejść składał się z: parametrów obróbki, sygnału z czujnika drgań, składnych siły szlifowania oraz sygnału RMS. Do budowy modelu stanu ściernicy zastosowano algorytm uczenia z propagacją wsteczną. Badania wykazały, że procentowy udział prawidłowych odwzorowań systemu wynosił 83,3%, który udało się dodatkowo zwiększyć do 94,5% przez selekcję informacji podawanych na wejście sieci (tab. 2.5.1). Z punktu widzenia potencjalnych zastosowań przemysłowych, osiągnięty wskaźnik prawidłowych rozpoznań należy nadal uznać za niezadowalający.

	wektor wejść – zbiór wybranych cech												udvial				
struktura sieci	parametry obróbki		drgania		siły		drgania gęstość widmowa		EA: RMS		EA: gęstość widmowa RMS		prawidłowych				
	Q	а	σ_{dr}	Δ_{dr}	F_{c}	F_n	μ	M_{dr}^{PS}	σ_{dr}^{PS}	Δ_{dr}^{PS}	M_{EA}	σ_{EA}	Δ_{EA}	M_{EA}^{PS}	σ_{EA}^{PS}	Δ_{EA}^{PS}	ouwzorowan
16-15-1	•	•	•	٠	•	•	٠	•	•	•	•	•	•	•	•	•	83,3 %
16-11-1	•	•	•	٠	•	•	٠	•	•	•	•	•	•	•	•	•	83,3 %
10-4-1	•	•	•	0	0	0	0	•	•	•	٠	٠	٠	0	0	•	88,9 %
8-3-1	•	•	٠	0	0	0	0	•	0	•	•	0	٠	0	0	•	94,5 %

Tab. 2.5.1. Selekcja danych doświadczalnych [RLL2000]

Autorzy zwracają uwagę, że nierozwiązanym problemem pozostaje znalezienie obiektywnych kryteriów oceny stępienia ściernicy, szczególnie takich które byłyby skorelowane z jakością technologiczną przedmiotu.

2.5.4. Sterowanie procesem szlifowania

W szeregu prac badawczych, które opisano m.in. w artykułach [Lez1996, BB1997, OB2000, BB2000, RLL2000], opisano podstawy teoretyczne, a także zaprezentowano wyniki praktycznego zastosowania (prace [BB1997, BB2000, OB2000]) analizy sygnału emisji akustycznej do sterowania i nadzorowania procesu szlifowania na przykładzie szlifowania kłowego wałków.

W pracach teoretycznych [Lez1996, RLL2000] zaprezentowano strukturę inteligentnego systemu szlifowania, jego funkcje w procesie szlifowania wgłębnego wałków oraz zaproponowano proponowaną realizację sprzętową takiego sytemu. Według autorów, nierozwiązanym problemem pozostaje obiektywna ocena zużycia ściernicy, która byłaby skorelowana z jakością technologiczną przedmiotu i sygnałami rejestrowanymi podczas obróbki. Dodatkowo wskazują oni, że badania powinny być kontynuowane w kierunku zastosowania rozwiniętych metod sztucznej inteligencji.

Praktyczne rezultaty działania układu sterowania adaptacyjnego (AC) procesem szlifowania zewnętrznych powierzchni walcowych, zaprezentowano w artykułach [OB2000, BB1997] i [BB2000]. Zbudowany na potrzeby badań układ sterowania adaptacyjnego w sposób pośredni, poprzez pomiary wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej, dokonywał oceny chropowatości powierzchni obrabianej. Schemat zbudowanego układu w oparciu o szlifierkę RUP 28N1-CNC został przedstawiony na rys. 2.5.14 (D38).

Całym cyklem obróbki, złożonym z etapu szlifowania zgrubnego i wykończeniowego, sterował komputer z odpowiednio dostosowanym oprogramowaniem, które pozwalało sterować układami napędowymi szlifierki, dostosowując posuw wgłębny ściernicy (v_f) oraz obroty przedmiotu (n_w) zgodnie z regulowanymi poziomami wartości skutecznej EA. Ponadto, sygnał EA został wykorzystany do automatycznego rozpoznawania momentu, w którym następował styk ściernicy z przedmiotem obrabianym.



Rys. 2.5.14. Schemat budowy układu sterowania procesem szlifowania powierzchni walcowych [OB2000]

W celu kalibracji układu, pełen cykl szlifowania zrealizowano ze stałymi prędkościami posuwów. W tym czasie sygnał EA, w kolejnych etapach procesu, został poddany akwizycji, a w komputerze zostały wyliczone jego deskryptory, które z kolei zostały wykorzystane jako wartości zadane dla szlifowania regulowanego. Przykładowy przebieg procesu z regulowaną wartością skuteczną emisji akustycznej, składający się z etapu szlifowania zgrubnego oraz wykończeniowego, przedstawiono na rys. 2.5.15 (D38).



Rys. 2.5.15. Przykładowy przebieg procesu z regulowaną wartością skuteczną EA [OB2000]

Moment, w którym następował pierwszy kontakt ściernicy z powierzchnią przedmiotu obrabianego rozpoznawany był przez analizę narastania sygnału EA. Jeżeli wartość tego sygnału osiągnęła wartość progową (U_p) , następowało przełączenie prędkości posuwu (v_f) i uruchomienie układu sterowania adaptacyjnego, który redukował prędkość do wartości, przy której wartość RMS odpowiadała wartości zadanej (U_{zz}) . Analogicznie postępowano w etapie obróbki wykończeniowej, przyjmując odpowiedni poziom RMS.

Autorzy przeprowadzili porównanie wyników (rys. 2.5.16, \Box 39) efektywności szlifowania konwencjonalnego ze szlifowaniem regulowanym, stosując te same warunki i parametry obróbki. Po pewnym czasie pracy ściernicy (odpowiadającego właściwej objętości zeszlifowanego materiału $V'_w = 125 \text{ mm}^3/\text{mm}$), gdy uległa ona stępieniu, występował wyraźny wzrost wartości chropowatości w przypadku szlifowania konwencjonalnego w stosunku do szlifowania ze sterowaniem.



Rys. 2.5.16. Porównanie zmian chropowatości (a) i odchyłek okrągłości (b) dla procesu konwencjonalnego i ze sterowaniem [OB2000]

Podobnie, analiza odchyłek okrągłości wskazała na korzyści wynikające z wykorzystania szlifowania z regulacją sygnału EA, które charakteryzowało się wyraźnie mniejszym rozrzutem wartości odchyłki okrągłości. Wynika to z faktu, że przy szlifowaniu regulowanym występuje stabilizacja sygnału *EA_{RMS}*, a tym samym siły normalnej szlifowania i odkształcenia sprężystego przedmiotu podczas obróbki, które bezpośrednio wpływa na wartość odchyłki okrągłości. Uzyskane wyniki badań wykazały, że sygnał EA dobrze odzwierciedla przebieg szlifowania i bez większych nakładów można zastosować analizę tego sygnału do regulacji procesu, w celu uzyskania możliwości sterowania jakością przedmiotu obrabianego oraz skrócenia czasu obróbki. Przedstawiony układ pomiarowy rejestrujący sygnał EA potwierdził, że bez żadnych zmian konstrukcyjnych szlifierki, związanych z instalacją czujnika emisji akustycznej (w przeciwieństwie do instalacji czujnika sił), można bardzo łatwo przystosować szlifierkę do nadzorowania i regulacji przebiegu procesu.

Inne zastosowania

Poza powyżej przytoczonymi zagadnieniami, emisję akustyczną, jako metodę pomiarową zagadnień związanych z procesem szlifowania, wykorzystano do: monitorowania operacji ostrzenia ściernicy w zabiegu obciągania [Ina1985, FCO1999, Bat1997], wykrywania pierw-szego kontaktu z materiałem oraz końca pracy ściernicy (wyiskrzania) [DH1984, WMB1994], wykrywanie drgań w procesie szlifowania [KS2001], oceny zdolności skrawnych pojedyn-czych ziaren ściernych [BPH1990, HLR1994, PliS1998.1, PliS1998.2, PliS1999] oraz bada-nia procesu pękania ziaren [Smo1997].

2.6. Wnioski z analizy literatury

Analiza literatury związanej z tematyką niniejszej pracy, wskazuje na szereg wniosków odnoszących się od metod i technik oceny okresu trwałości ściernic z wykorzystaniem sygnału emisji akustycznej. Poniżej zamieszczono najważniejsze konkluzje dotyczące tego zagadnienia.

Pierwszym i najistotniejszym wnioskiem dotyczącym problematyki oceny trwałości ściernicy jest to, że nie powstała dotychczas metoda badań na tyle uniwersalna, aby tylko za jej pomocą można było w pełni poznać i ocenić geometrię CPS podczas procesu szlifowania. Ponadto, w warunkach produkcyjnych bezpośrednia kontrola wielkości wyjściowych, stanowiących kryteria trwałości, jest trudna lub niemożliwa. Dlatego w praktyce dokonuje się oceny trwałości ściernicy poprzez ocenę szacunkową, w oparciu o zewnętrzne zaobserwowane objawy utraty zdolności skrawnych CPS [PC1985]:

- nadmierny wzrost drgań układu OUPN;
- pojawiające się przypalenia szlifierskie na powierzchni przedmiotu obrabianego;
- ton dźwięku wydawanego przez wirującą ściernicę;
- i inne.

Jednakże badacze i producenci uważają te oceny za subiektywne i niewystarczające do właściwej oceny okresu trwałości ściernicy, co może doprowadzić do wzrostu kosztów produkcji. Istniejące metody są albo uciążliwe i pracochłonne, albo ich wyniki posiadają niewielką korelację w wynikami obróbki, albo cechują się dużymi kosztami ich zastosowania i koniecznością ingerencji w budowę obrabiarki.

Metoda EA stała się jednym z narzędzi współczesnej techniki i badań naukowych nad nieniszczącymi metodami badania procesów i ich wyników. Ocena procesu, oparta na interpretacji zmian emisji akustycznej jest doskonałym narzędziem pod warunkiem, że rozumie się jej możliwości oraz ograniczenia.

Przyczyny rozwoju tej metody wynikają z istoty samego zjawiska i zalet technicznych metody, do których należy zaliczyć następujące aspekty:

- Zakres badanych częstotliwości EA leży znacznie powyżej częstotliwości sygnałów wibroakustycznych i mechanicznych, które mogą być łatwo odfiltrowane.
- Sygnały EA pochodzą z całego obiektu, a nie tylko z jego powierzchni, jak to ma miejsce w wielu metodach nieniszczącej kontroli.
- Monitoruje się aktywne źródło fali akustycznej, jego lokalizacja jest więc łatwiejsza, niż na przykład umiejscowienie ukrytej wady materiału wykrywalnej przez odbicie fali ultradźwiękowej.
- Sygnały EA zawierają informacje o początkowym stadium zmian mikrostruktury materiału, niedającym się zaobserwować innymi metodami, powolnych, lecz mogących doprowadzić do nagłej katastrofy procesach degradacji materiałów i obiektów technicznych oraz informacje o procesach fizycznych i chemicznych trudnych do obserwacji innymi metodami.
- EA wprowadza możliwość oceny zużycia ostrza oraz wykrywania wykruszeń i katastroficznego stępienia ziaren w czasie obróbki. Poza tym, daje też możliwość wykrywania znacznych wyłamań ziaren w ich początkowym stadium, nieosiągalna innymi metodami.

Metoda EA ma również pewne wady. Należą do nich głównie trudności w określeniu bezwzględnej wartości sygnałów EA oraz trudności w wyeliminowaniu sygnałów zakłócających, które są wynikiem tego, że między źródłem a odbiornikiem sygnał EA ulega zmianie w kolejnych fazach jego przenoszenia. Najważniejszymi procesami wprowadzającymi zniekształcenia są: odbicie i tłumienie fal sprężystych wewnątrz badanego obiektu, tłumienie fali w warstwie pośredniej między obiektem a przetwornikiem, zniekształcenia liniowe i nieliniowe wprowadzane przez przetwornik oraz zniekształcenia powodowane przez wzmacniacze, filtry i aparaturę rejestrującą.

Dzięki zastosowaniu sygnałów emisji akustycznej, jako narzędzia pomiarowego w procesie szlifowania, można monitorować wiele jego aspektów.

Z analizy literatury dotyczącej oceny okresu trwałości ściernic z wykorzystaniem sygnału emisji akustycznej w procesie szlifowania wynika, że wpływ zużycia na amplitudę sygnału jest bardzo różny w różnych zakresach częstotliwości. Przeprowadzone badania wykazały, że sygnały w paśmie 300 – 1200 Hz zależne są od zużycia ściernicy i w związku z tym mogą być wykorzystane do wyznaczenia zakończenia okresu trwałości ściernicy [LPG1989]. Ponadto, analiza danych uzyskanych z doświadczeń przeprowadzonych dla pojedynczych ziaren, udowodniła, że różne zjawiska towarzyszące zużyciu ziarna ściernego są wyraźnie rozróżnialne dzięki ich niepowtarzalnym sygnaturom w zakresie przebadanych częstotliwości [HLR1994].

Przeprowadzone analizy statystyczne wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej (EA_{RMS}) w postaci wariancji i odchylenia standardowego wykazały, że parametry te mogą być dobrymi miernikami zużycia narzędzia, choć zauważono tu, że korelacja jest zależna od prędkości posuwu wgłębnego (obciążenia w strefie) i maleje ze zmniejszeniem tej prędkości [LL2000]. Zmiany średniej wartości skutecznej (EA_{RMS}) wykazały dobrą korelację ze zmianami parametrów oceny stanu czynnej powierzchni ściernicy [DH1984]. Również dobrą korelację zaobserwowano pomiędzy wartością skuteczną oraz energią sygnału (E_{EA}), a chropowatością powierzchni szlifowanej (parametr $R_{a(w)}$), czego nie wykazano w odniesieniu do składowych siły szlifowania (F_c i F_n) [PD1999].

Oznacza to, że sygnał EA dobrze odzwierciedla przebieg szlifowania i bez większych nakładów można zastosować analizę tego sygnału do regulacji procesu w celu uzyskania możliwości sterowania jakością przedmiotu obrabianego oraz skrócenia czasu obróbki.

Po szeregu prac opisujących podstawy teoretyczne analizy sygnału emisji akustycznej do sterowania i nadzorowania procesu szlifowania, znalazły się prace badawcze, które reprezentowały grupę praktycznego wykorzystania sygnału EA. Zaprezentowano m.in. działanie układu sterowania adaptacyjnego (AC) procesem szlifowania zewnętrznych powierzchni walcowych, w którym w sposób pośredni poprzez pomiary wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej szacowano chropowatość powierzchni obrabianej. Po pewnym czasie pracy ściernicy, gdy uległa ona stępieniu, występował wyraźny wzrost wartości chropowatości w przypadku szlifowania konwencjonalnego w stosunku do szlifowania, w którym sterowano parametrami obróbki [OB2000].

Podobnie, analiza odchyłek okrągłości wskazała na korzyści wynikające z wykorzystania szlifowania z regulacją sygnału EA, które charakteryzowało się wyraźnie mniejszym rozrzutem wartości odchyłki okrągłości. Wynika to z faktu, że przy szlifowaniu regulowanego występuje stabilizacja sygnału EA_{RMS} , a tym samym siły normalnej szlifowania i odkształcenia sprężystego przedmiotu podczas obróbki, które bezpośrednio wpływa na ja-kość wyrobu [BB2000].

W kolejnych pracach (m.in. [RLL2000], [PDP2000]), autorzy proponują zbudowanie systemu oceny zużycia ściernicy opartego na sztucznej sieciach neuronowych. Neuronowy systemu diagnostyki ściernicy, którego wektor wejść składał się z parametrów obróbki, sygnału z czujnika drgań, składnych siły szlifowania oraz sygnału wartości skutecznej emisji akustycznej wykazał, że procentowy udział prawidłowych odwzorowań systemu wynosił maksymalnie 83,3%, co z punktu widzenia potencjalnych zastosowań przemysłowych należy uznać za niezadowalający wynik.

Ponadto, autorzy zwracają uwagę, że nierozwiązanym problemem pozostaje znalezienie obiektywnych kryteriów oceny stępienia ściernicy, szczególnie takich które byłyby skorelowane z jakością technologiczną przedmiotu. Zalecają, aby dalsze badania skupić nad budową kompletnego systemu do pomiarów CPS i kompensowania zużycia ściernicy oraz odchyłek ciepła w strefie szlifowania [RLL2000].

Wyniki analiz dają również podstawy do kontynuowania badań z zakresu zastosowania EA do oceny zdolności skrawnych narzędzi ściernych, jak i stanu warstwy wierzchniej obrabianego materiału (oraz pełniejszą ocenę jej właściwości), m.in. do nadzorowania stanu naprężeń w warstwie wierzchniej.

3. CEL, HIPOTZA I ZAKRES PRACY

3.1. Cele pracy

W związku z przeprowadzoną analizą źródeł literaturowych na temat oceny okresu trwałości ściernic z wykorzystaniem sygnału emisji akustycznej w procesie szlifowania, sformułowano cele niniejszej pracy.

Celem poznawczym pracy jest dokonanie oceny zużycia ściernicy i wyznaczenie jej okresu trwałości poprzez znalezienie korelacji pomiędzy wartością skuteczną sygnału emisji akustycznej, a wielkościami charakteryzującymi postępujące zużycie czynnej powierzchni ściernicy, czyli jej parametrami geometrycznymi oraz wielkościami wyjściowymi procesu dla przypadku obwodowego szlifowania powierzchni płaskich (F_c , F_n , EA_{RMS} , R_a , σ_{max}).

Obecnie bezpośrednia kontrola CPS w trakcie przebiegu procesu jest utrudniona, a stosowane dynamiczne metody bezpośredniej (pomiary fotometryczne) lub pośredniej (pomiary i analiza siły, mocy, drgań, promieniowania podczerwonego) oceny zużycia są mało dokładne, skomplikowane i kosztowne.

Kolejnym celem jest zatem wyznaczenie takich parametrów emisji akustycznej, opisujących pośrednio stan czynnej powierzchni ściernicy, które posiadają najwyższy stopień korelacji z poszczególnymi cechami geometrycznymi CPS (np. B_{kr} , l_{st}), ze wskaźnikiem zdolności skrawnej (K_{CPS}), ale równocześnie mogą posłużyć do oceny i przewidywania wyników obróbki, czyli własności geometryczno-fizycznych warstwy wierzchniej przedmiotu szlifowanego (np. $R_{a(w)}$, σ_{max}). Analiza wyników badań powinna pozwolić na określenie współczynnika lub minimalnej grupy parametrów, które ujmowałby wartość skuteczną sygnału EA, jako zasadniczy parametr do oceny okresu trwałości ściernicy. Zakłada się, że na podstawie znajomości wartości tych parametrów, możliwe będzie określenie aktualnego stanu (zużycia) ściernicy oraz wskazanie potrzeby odnowienia czynnej powierzchni ściernicy, co równoważne jest z dokonaniem oceny okresu trwałości narzędzia.

Celem praktycznym pracy jest identyfikacja zużycia ściernicy poprzez zaprojektowanie systemu o strukturze umożliwiającej wyznaczenie: aktualnego stanu czynnej powierzchni oraz momentu utraty zdolności skrawnych. System ten oparty będzie na elementach sztucznej inteligencji, co pozwoli na zawarcie w nim ukrytych zależności, które nie zostaną ujawnione w trakcie analizy analitycznej wyników badań eksperymentalnych. Przewaga niniejszej pracy nad dotychczas zrealizowanymi projektami systemów nadzorowania procesu szlifowania wynika z założenia, że sygnał EA będzie skojarzony z parametrami geometrycznymi CPS, uniknie się całego otoczenia pomiarów (pomiaru wielu różnego rodzaju sygnałów), a system diagnostyki ściernicy będzie maksymalnie uproszczony.

3.2. Hipoteza badawcza

Na podstawie analizy źródeł literaturowych, w których opisano aktualny stan wiedzy i stosowane techniki w zakresie wyznaczonym przez temat niniejszej pracy, oraz na podstawie rozważań własnych problemu, sformułowano następującą hipotezę:

66 Ponieważ wartość skuteczna sygnału emisji akustycznej niesie bezpośrednie informacje o zjawiskach zachodzących w strefie szlifowania i może stanowić ich miarę ilościową oraz zawiera większą ilość informacji o procesie, niż inne wielkości charakteryzujące przebieg szlifowania, należy oczekiwać, że pozwoli ona na określenie chwilowej zdolności skrawnej ściernicy, a tym samym dokładniejszą ocenę jej okresu trwałości.

3.3. Zakres pracy

Zakresowi pracy została nadana taka forma, aby w wyniku realizacji badań i analiz jednoznacznie określić zgodność przyjętej hipotezy naukowej z rzeczywistością. W celu zrealizowania powyższych zamierzeń, przyjęto następujący zakres pracy:

- 1. Przeprowadzanie analizy źródeł literaturowych, czyli aktualnego stanu wiedzy wyznaczonego przez temat pracy.
- 2. Przeprowadzenie rozpoznawczych badań doświadczalnych w zakresie:
 - a) Wstępnego określenia przewagi rejestracji sygnału EA nad kontrolą składowych siły szlifowania w procesie, szczególnie odnośnie szybkości reakcji czujników tych wielkości wyjściowych.
 - b) Określenia związków między obserwowalnymi wartościami sygnału EA, a obciążeniami ściernicy w strefie obróbki.
 - c) Zbadania korelacji wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej z chropowatością powierzchni przedmiotu szlifowanego.
 - d) Wyznaczenia kierunku i warunków badań, które będą uwzględnione w kolejnych badaniach.
- 3. Przeprowadzenie właściwych badań doświadczalnych w zakresie:
 - a) Dokonania oceny zużycia ściernicy i wyznaczenia jej okresu trwałości na podstawie zmierzonych zmian parametrów geometrycznych, opisujących stan czynnej powierzchni ściernicy (CPS), oraz na podstawie zaobserwowanych wielkości wyjściowych procesu szlifowania, w tym składowej stycznej (F_c), składowej normalnej (F_n) siły szlifowania oraz wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej (EA_{RMS}).
 - b) Znalezienia korelacji pomiędzy rejestrowaną wartością skuteczną sygnału emisji akustycznej (EA_{RMS}) i jej pochodnymi, a wielkościami charakteryzującymi postępujące zużycie czynnej powierzchni ściernicy, które z kolei posiadają znaczący wpływ na jakość szlifowanych powierzchni.
 - c) Pośredniego określenia postępującej utraty zdolności skrawnej ściernicy poprzez wyznaczenie trendu zmian, zarówno parametrów opisujących zmiany zachodzące w warstwie wierzchniej, jak i chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego.
 - d) Scharakteryzowania relacji pomiędzy rejestrowanymi parametrami sygnałami emisji akustycznej, a wybranymi cechami powierzchni przedmiotu poddanego obróbce.

- e) Zaproponowanie wskaźników sygnału EA oraz ustalenie ich korelacji ze zużyciem ściernicy, a w szczególności ze zmianami geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej (także z pominięciem parametrów geometrycznych powierzchni ściernicy).
- 4. Określenie zależności występującej pomiędzy przebiegami zmienności poszczególnych czynników wyjściowych procesu, poprzez opracowywanie specjalnego algorytmu służącego do ilościowej oceny zgodności przebiegu dwóch parametrów z pominięciem wyznaczania funkcji regresji oraz współczynnika korelacji, które w wielu przypadkach są co najmniej niewystarczające (ze względu np. na tendencję do gromadzenia się punktów w określonych grupach) i mogą dać błędne wnioski.
- 5. Zaproponowanie systemu nadzorowania procesu szlifowania, łączącego w sobie nie tylko zadania monitorowania, diagnostyki, sterowania, ale również optymalizacji. Zakłada się, że system realizując zadanie oceny zużycia ściernicy oraz sterowania jej obciążeniem w strefie szlifowania, powinien uwzględniać jakościowe kryterium obróbki oraz zbudowany zostanie w oparciu o wybrane formy sztucznej inteligencji.

4. BADANIA DOŚWIADCZALNE

W poniższym rozdziale rozprawy doktorskiej zamieszczono opis wykonanych badań własnych, które obejmowały badania doświadczalne rozpoznawcze oraz właściwe. Określono szczegółowo cel eksperymentów, a także podano zakres, w jakim zostały one przeprowadzone. Następnie przedstawiono metodykę badań, w tym program doświadczeń oraz technikę pomiarów, a także opis stanowisk badawczo-pomiarowych. W kolejnej części niniejszego rozdziału zamieszczono sprawozdanie z wyników pomiarów, które odpowiednio sklasyfikowano na grupy merytoryczne i przedstawiono w wybranej formie graficznej i opisowej.

Dalsza cześć niniejszego rozdziału zawiera analizę wyników badań doświadczalnych, czyli słowny opis przebiegu stwierdzonych doświadczalnie zależności, analizę statystyczną, w tym dokonaną ocenę istotności i dokładności wyników badań oraz aproksymację podstawowych zależności doświadczalnych za pomocą odpowiednich wzorów empirycznych. W analizie zawarto także uzasadniony pogląd autora na przyczyny stwierdzonych zjawisk i uzyskanych korelacji doświadczalnych. Równocześnie dokonano oceny, w jakim stopniu postawiona przed badaniami hipoteza znalazła odzwierciedlenie w badaniach doświadczalnych.

W końcowej części rozdziału zamieszczono najważniejsze wnioski, jakie uzyskano w wyniku realizacji badań doświadczalnych i rezultaty ich analizy.

Badania doświadczalne podzielono na dwa etapy. Pierwszy to badania wstępne (rozpoznawcze), których wyniki pozwoliły ustalić m.in. obszar prac dla drugiego etapu – badań właściwych. Dla obu części badawczych określono osobny cel i zakres, w jakim zostały one przeprowadzone.

4.1. Cel i zakres badań

Najważniejsze cele, do których miały doprowadzić przeprowadzone badania doświadczalne były następujące:

- 1. Określenie przewagi rejestracji sygnału EA nad kontrolą składowych siły szlifowania w procesie, szczególnie odnośnie szybkości reakcji czujników tych wielkości wyjściowych.
- 2. Określenie związków między obserwowalnymi wartościami sygnału EA, a obciążeniami ściernicy w strefie obróbki.
- Dokonanie oceny zużycia ściernicy i wyznaczenie jej okresu trwałości na podstawie zmierzonych zmian parametrów geometrycznych opisujących stan czynnej powierzchni ściernicy (CPS).
- 4. Określenie postępującej utraty zdolności skrawnej ściernicy poprzez wyznaczenie trendu zmian, zarówno parametrów opisujących zmiany fizyczne zachodzące w warstwie wierzchniej, jak i chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego.
- 5. Wyznaczenie trendu w zmianach obserwowanych wielkości wyjściowych procesu szlifowania, w tym składowej stycznej siły szlifowania (F_c), składowej normalnej siły szlifowania (F_n) i powiązanie ich ze zużyciem czynnej powierzchni ściernicy.
- 6. Wyznaczenie wybranych parametrów statystycznych odnoszących się do rozkładu badanej cechy (siły i emisja akustyczna) oraz określenie korelacji pomiędzy tymi parametrami,

a wielkościami charakteryzującymi postępujące zużycie czynnej powierzchni ściernicy, które z kolei posiadają znaczący wpływ na jakość szlifowanych powierzchni.

- 7. Znalezienie relacji pomiędzy wybranymi pochodnymi sygnału emisji akustycznej, a parametrami chropowatości powierzchni oraz maksymalnymi naprężeniami zalegającymi w warstwie wierzchniej przedmiotu poddanego obróbce.
- 8. Ustalenie współczynnika ujmującego rejestrowaną wartość skuteczną sygnału emisji akustycznej (*EA_{RMS}*), jako zasadniczego parametru wykorzystywanego do oceny ilości energii emisji akustycznej przypadającej na jednostkową powierzchnię kontaktu *ściernicaprzedmiot obrabiany*. Powiązanie tego współczynnika z okresem trwałości ściernicy.
- 9. Zaproponowanie wskaźników sygnału EA, które z pominięciem pomiarów parametrów geometrycznych powierzchni ściernicy, pozwolą dokonać przybliżonej oceny zużycia ściernicy, a w szczególności będą korelować ze zmianami geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej (*K*_{CPS}).

Zakres badań doświadczalnych obejmował pierwsze dwa cele, pozostałe należą do grupy badań właściwych.



Rys. 4.1.1. Schemat procesu obwodowego, stycznego szlifowania powierzchni płaskich [N92/1002/5]

Badania własne obejmowały proces obwodowego, stycznego szlifowania powierzchni płaskich (rys. 4.1.1, D47). Ze względu na pożądane właściwości (wysoka zdolność skrawna, ostrość i kruchość krawędzi ziaren), zdecydowano się zastosować ściernice z elektrokorundu szlachetnego. Typowym zastosowaniem tego typu materiału jest: szlifowanie i ostrzenie narzędzi, szlifowanie płaszczyzn, otworów i wałków.

Zakres badań obejmował wyznaczenie charakterystyki geometrycznej czynnej powierzchni ściernic, pomiary składowych siły szlifowania (F_c , F_n), sygnału emisji akustycznej (w postaci przetworzonej do wartości skutecznej EA_{RMS}) oraz pomiary profilu chropowatości i naprężeń w warstwie wierzchniej szlifowanych elementów.

Osiągnięcie wcześniej wymienionych celów, wymagało przeprowadzania badań z użyciem ściernic charakteryzujących się różną twardością i stopniem zużycia CPS w trakcie usuwania materiału podczas obrotu narzędzia.

Charakteryzując geometrię czynnej powierzchni ściernicy wzięto pod uwagę szereg różnych parametrów opisujących jej makro- i mikrogeometrię. Natomiast za wskaźniki jakościowe otrzymywanych powierzchni szlifowanych przyjęto wybrane wielkości charakterryzujące mikrogeometrię, a także wielkości charakteryzujące stan warstwy wierzchniej, czyli zmienne cechy fizyczno-chemiczne w stosunku do materiału rdzenia.

W trakcie badań doświadczalnych przeprowadzono około 7500 pomiarów oraz blisko 4700 obliczeń prowadzących do otrzymania wartości parametrów wynikowych (będących rezultatem wykonanych rachunków na podstawie wartości parametrów wejściowych oraz parametrów zmierzonych na wyjściu procesu):

- badania rozpoznawcze:
 - 240 pomiarów w trakcie ustalania istotności czynników wejściowych (4 badane czynniki wyjściowe × 20 punktów planu eksperymentu × 3 powtórzenia),
 - 300 pomiarów w trakcie ustalania minimalnej ilości powtórzeń (5 badanych czynników wyjściowych × 3 prędkości posuwu × 20 powtórzeń),
 - 156 pomiarów niezbędnych do opracowania uproszczonych modeli statystycznomatematycznych (4 badane czynniki wyjściowe × 13 punktów planu eksperymentu × 3 powtórzenia),
 - 80 pomiarów wykorzystanych do oceny rozpiętości badań, a także do określania zgrubnej zależności między rejestrowanymi sygnałami sił i emisji akustycznej, a otrzymywaną chropowatością powierzchni obrabianej (4 badane czynniki wyjściowe × 4 serie pomiarowe × 5 różnych warunków pracy ściernicy),
- badania właściwe (33 punkty pomiarowe dla ściernicy J + 38 punktów pomiarowych dla ściernicy M × 3 powtórzenia = łącznie 213 punktów pomiarowych):
 - 2556 pomiarów związanych z opisem zużycia ściernicy (12 parametrów mierzonych × 213 punktów pomiarowych),
 - 3621 pomiarów związanych z opisem mikrogeometrii oraz naprężeń zalegających w warstwie wierzchniej przedmiotu poddanego obróbce (17 parametrów mierzonych × 213 punktów pomiarowych),
 - 639 pomiarów sygnałów siły szlifowania i towarzyszącej mu emisji akustycznej (3 parametry mierzone × 213 punktów pomiarowych).

Podane powyżej wyliczenie nie obejmuje parametrów obliczonych na podstawie wielkości zmierzonych (tzw. parametrów wynikowych). Ponadto, liczby te nie uwzględniają wszystkich wykonanych rachunków, a stanowią jedynie zgrubną ocenę pracochłonności wykonanej pracy.

4.2. Metodyka badań

Badania doświadczalne przeprowadzono w dwóch zależnych seriach:

- Badania rozpoznawcze wstępnie określające zależności pomiędzy obciążeniem ściernicy i chropowatością powierzchni obrabianej, a mierzonymi sygnałami wyjściowymi procesu szlifowania.
- Badania właściwe określające utratę zdolności skrawnej wybranych ściernic w funkcji czasu ich pracy, połączone z szeroką analizą przebiegu procesu.

Należy podkreślić, że wyniki badań rozpoznawczych stanowiły o doborze parametrów i zakresie badań właściwych (w tym o niezbędnej liczbie powtórzeń, przy założonej ich powtarzalności).

Program badań obejmował ocenę stanu czynnej powierzchni ściernicy na drodze pomiaru zużycia kształtowego (analiza zarysów mikro- i makrogeometrii CPS) w różnych warunkach obróbki, w tym dla różnego stopnia zużycia ściernicy. Ocena ta została uzupełniona badaniami własności eksploatacyjnych, obejmującymi pomiary wybranych wielkości wyjściowych procesu szlifowania w określonych momentach czasu (składowe siły szlifowania, wartość skuteczna sygnału EA, parametry chropowatości powierzchni szlifowanych oraz wartości naprężeń skumulowanych w warstwie wierzchniej przedmiotów poddanych obróbce) – rys. 4.2.1 (□49).



Rys. 4.2.1. Schemat modelu badań z podziałem na czynniki: wejściowe (X, C), wyjściowe (Y) oraz zakłócenia (Z)

Model badań eksperymentalnych zawierał szereg czynników, które można podzielić na trzy zasadnicze grupy: czynniki wejściowe (stałe i zmienne), wyjściowe (mierzone sygnały i parametry charakteryzujące CPS oraz powierzchnię obrabianą) oraz zakłócenia, które posiadały nieznany wpływ na otrzymywane wyniki (tab. 4.2.1, D49).

Tab. 4.2.1.	Czynniki	wejściowe	i wyjściowe	modelu	badań	eksperymenta	lnych
-------------	----------	-----------	-------------	--------	-------	--------------	-------

	$X = \{x_1, x_2, x_3\}$ – zmienne wielkości wejściowe:					
x_I :	v_{ft} – prędkość posuwu stycznego stołu szlifierki,					
<i>x</i> ₂ :	J/M – nominalna twardość ściernicy,					
<i>x</i> ₃ :	t – czas szlifowania.					
	$C = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6\}$ – niezmienne wielkości wejściowe (constans):					
c_l :	NC10 – rodzaj materiału obrabianego i wymiary próbek (długość – $l_{(w)}$, szerokość – $b_{(w)}$, wysokość – $h_{(w)}$),					
<i>c</i> ₂ :	v_s – prędkość obwodowa ściernicy,					
<i>c</i> ₃ :	a_e – styk roboczy, styk ściernicy określony w płaszczyźnie roboczej prostopadle do kierunku ruchu posuwowego podstawowego,					
<i>C</i> ₄ :	f_a – posuw osiowy stołu,					

Tab. 4.2.1. (ciąg dalszy)

<i>C</i> ₅ :	Q_c – wydatek cieczy chłodząco-smarującej,							
<i>c</i> ₆ :	<i>Parametry zabiegu obciągania:</i> $v_{s(d)}$ – prędkość obwodowa ściernicy w procesie ostrzenia ściernicy, $v_{f(d)}$ – prędkość posuwu obciągacza, a_d – dosuw obciągacza w procesie ostrzenia ściernicy między kolejnymi skokami.							
	$Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6\}$ -wielkości wyjściowa	e:						
<i>y</i> ₁ :	Siła szlifowania: F_c – składowa styczna siły szlifowania, F_n – składowa normalna siły szlifowania.							
<i>y</i> ₂ :	Parametry chropowatości powierzchni szlifowanej: $R_{a(w)}$ – średnia arytmetyczna rzędnych profilu przedmiotu obrabianego, $RS_{m(w)}$ – średni odstęp miejscowych wzniesień profilu, Δq – wartość średnich kwadratowych miejscowych wzniosów profilu, r_{ws} – średnia wartość promienia zaokrąglenia wierzchołków profilu, L_0 – względna długość profilu do długości odcinka pomiarowego, Rmr_{20} – wartość udziału materiałowego profilu na poziomie 20, T_z – udział strefy wierzchołkowej, W_z – udział strefy roboczej, QN_z – udział strefy quasi nominalnej.	$R_{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} y_{i} , RS_{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_{m(i)},$ $\Delta q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{y_{i} - y_{(i-1)}}{x_{i} - x_{(i-1)}}\right)^{2}},$ $r_{ws} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} 1 / \left(\frac{d^{2}y}{dx^{2}}\right),$						
<i>y</i> ₃ :	Parametry związane z oszacowaniem naprężeń: Δf – strzałki ugięcia swobodnego końca próbek, m_1 i m_2 – masy próbek przed i po trawieniu, t_{tr} – czas trawienia, σ_{max} – naprężenia maksymalne warstwy wierzchniej przedmiotu, $h_{\sigma max}$ – głębokości zalegania maksymalnych naprężeń w warstwiewierzchniej przedmiotu obrabianego.	$L_{0} = \frac{l_{rz}}{l_{n}}, Rmr = \sum_{i=1}^{n} l_{(i)} / l_{n},$ $R_{c} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^{n} y_{p(i)} + \sum_{i=1}^{n} y_{v(i)} \right),$						
<i>y</i> ₄ :	$ \begin{array}{ll} Mikrogeometryczne parametry CSP: \\ RS_{m(s)} & - {\rm \acute{s}redni} {\rm odstęp} {\rm miejscowych} wzniesień profilu, \\ R_c & - {\rm \acute{s}rednia} {\rm wartość} wysokości wzniesień profilu, \\ R_{a(s)} & - {\rm \acute{s}rednia} {\rm arytmetyczna} rzędnych profilu przedmiotu obrabianego, \\ R_z & - {\rm wysokość} {\rm profilu} {\rm chropowatości} według 10. {\rm punktów}, \\ D^2_{(z)} & - {\rm wariancja} rzędnych wzniesień {\rm profilu} {\rm na} {\rm CPS}, \\ S_{st} & - {\rm liczba} {\rm wierzchołków} ziaren {\rm statycznych} {\rm na} {\rm jednostkę} długości, \\ l_{st} & - {\rm starcie} względne wzniesień {\rm profilu} (dla {\rm wierzchołków} ziaren \\ {\rm aktywnych}). \\ Makrogeometryczne parametry CSP: \\ d_s & - {\rm \acute{s}rednica} zewnętrzna {\rm \acute{s}ciernicy}, \\ \Delta r_s & - {\rm zużycie} {\rm promieniowe} {\rm \acute{s}ciernicy}, \\ A_{sr} & - {\rm powierzchnia} {\rm zużycia} {\rm promieniowego}, \\ l_g & - {\rm \it geometryczna} długość {\rm styku} ({\rm strefy} {\rm szlifowania}), \\ A_s & - {\rm całkowita} {\rm powierzchnia} {\rm zużycia} {\rm \'{s}ciernicy}. \end{array} $	$R_{z} = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^{5} y_{p(i)} + \sum_{i=1}^{5} y_{v(i)} \right),$ $D_{(z)}^{2} = \sum_{i=1}^{n} \left(\overline{y} - y_{i} \right)^{2} / \sum_{i=1}^{n} w_{i},$ $\alpha_{kr} = \arcsin(\omega_{kr} / B_{kr}),$ $A_{kr} = 0, 5 \cdot \omega_{kr} \cdot b_{D},$ $A_{sk} = A_{kr} = 0, 5 \cdot \omega_{kr} \cdot b_{D},$ $S_{st} = N_{st} / l_{r},$ $A_{sr} = \omega_{kr} \cdot b_{(s)},$ $A_{s} = A_{sk} + A_{sr}.$						
<i>y</i> ₄ :	Zużycie krawędziowe CSP: B_{kr} – długość czynnej krawędzi ściernicy (dł. zużycia krawędziowego), α_{kr} – kąt zużycia krawędziowego ściernicy, Δr_{kr} – zużycie krawędziowe ściernicy, A_{kr} – powierzchnia zużycia krawędziowego ściernicy od strony natarcia, A_{sk} – całkowita powierzchnia zużycia krawędziowego ściernicy.							
<i>y</i> ₅ :	Sygnał emisji akustycznej: EA_{RMS} – wartość skuteczna sygnału emisji akustycznej, E_{EA} – energia emisji akustycznej.							

Ponieważ przypalenia szlifierskie powstają w wyniku wystąpienia zjawiska odpuszczania lub wtórnego zahartowania, gdy następuje nadmierny wzrost temperatury lub czas pracy ziarna w strefie szlifowania, a szybkość wzrostu temperatury i chłodzenia zależy od wielu czynników, m.in. od stępienia ziaren ściernych, sposobu chłodzenia i nastaw obróbki (np. prędkości posuwu) [Kac1970], postawiono ogólną hipotezę dotyczącą koncepcji badań, w tym obiektu badań, która pozwoliła określić metody i środki technologiczne.

Tab. 4.2.1. (ciąg dalszy)

<i>y6</i> :	Inne charakterystyczne parametry i wskaźniki procesu ⁷ : a_{zsr} – średnia elementarna głębokość szlifowania, V_s – zużycie objętościowe ściernicy, V_w – ubytek materiału obrabianego, G – wskaźnik szlifowania, W_G – wskaźnik zużycia, Q_w – wydajność objętościowa szlifowania, Z'_{sr} – średnia właściwa szybkość promieniowego zużycia objętościowego ściernicy, K_{CPS} – geometryczny wskaźnik zdolności skrawnej czynnej powierzchni ściernicy, P_s – moc szlifowania, P_{sw} – względna moc szlifowania.
	$Z = \{z_1, z_2,, z_n\}$ – wielkości zakłócające ⁸
Ζ	 błędy pomiarowe, niejednorodności zabiegu obciągania ściernicy, niedokładności nastaw parametrów procesu, inne czynniki zakłócające.

Otóż za podstawę oceny utraty zdolności skrawnej ściernicy, w trakcie prowadzonych badań doświadczalnych, przyjęto wskaźnik jakościowy powierzchni poddanej obróbce, którym był moment pojawienia się uszkodzeń tych powierzchni w postaci przypaleń szlifierskich. Jednocześnie utratę zdolności skrawnej oceniono ilościowo wykorzystując do tego celu wskaźniki makrozużycia (V_s , G, W_G , Z'_{sr}) oraz wskaźnik zdolności skrawnej czynnej powierzchni ściernicy (K_{CPS}).

4.2.1. Program badań

Badania eksperymentalne przeprowadzono w niezależnych seriach o różnej, zależnej od parametrów obróbki, ilości punktów pomiarowych. Dodatkowo przeprowadzono jedną serię badań, złożoną z 3 powtórzeń, dotyczącą określenia stanu czynnej powierzchni ściernicy po zabiegu obciągania. Poszczególne punkty pomiarowe cechowały się różnym stanem CPS, wynikającym z kolejnych czasów pracy ściernicy. Serie obejmowały szlifowanie płaszczyzn ze stałym wydatkiem chłodziwa przy różnych prędkościach posuwu wzdłużnego. Parametry obróbki były stałe lub zmienne – zależnie od etapu wykonywanych prac eksperymentalnych (badania wstępne lub właściwe).



Rys. 4.2.2. Przyrząd do statycznego wyrównoważenia ściernic [N02/6103]:
a) schemat, b) zdjęcie stanowiska wyrównoważenia ściernic;
1 - ściernica, 2 - oprawa, 3 - kamienie do wyrównoważenia, 4 - trzpień, 5 - korpus, 6 - prowadnice walcowe, 7 i 8 - elementy poziomujące, 9 - zderzaki.

⁷ Nie zamieszczono na schemacie.

⁸ Ilość czynników zakłócających nie jest znana.

Przebieg badań doświadczalnych był procesem złożonym. Badania rozpoczęto od wstępnych operacji pomocniczych. Zaczęto od założenia ściernic w oprawach. Następnie wyrównoważono statycznie ściernice w przyrządzie do wyrównoważenia (rys. 4.2.2, D51) zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie [N02/6103].

Kolejnym krokiem było zamocowanie ściernicy na szlifierce i wykonanie zabiegu uzdatniania czynnej powierzchni ściernicy (profilowanie połączone z ostrzeniem). W celu zbadania stabilności (wykrycia ewentualnych zakłóceń i ich lokalizacji) pracy układu, dokonano diagnozy szlifierki za pomocą czujnika drgań z przyssawką magnetyczną, dla różnych prędkości obwodowych ściernicy pracującej bez obciążenia. Następnie zamocowano próbki, wyrównano ich powierzchnie, naostrzono ściernicę i przeprowadzono proces szlifowania do określonego momentu wyrażonego zużyciem (stanem) czynnej powierzchni ściernicy.

Po obciąganiu oraz po określonych czasach szlifowania (t), odpowiadającym kolejnym wartościom zeszlifowanej objętości materiału (V_w), rejestrowano wybrane wielkości wyjściowe procesu, a także zmierzono wybrane cechy makro- i mikrogeometrii ściernicy oraz parametry profili chropowatości próbek. Dodatkowo w badaniach właściwych zmierzono naprężenia zalegające w warstwie wierzchniej przedmiotów obrabianych oraz zdejmowano profil zarysu osiowego ściernicy, odwzorowując tworzącą osiową roboczej powierzchni ściernicy na żyletce metodą jej wcinania na głębokość około 0,2 mm.

Wszystkie eksperymenty przeprowadzono z użyciem ściernic, które wcześniej w ustalonych warunkach i przy odpowiednich parametrach szlifowały dodatkowe próbki (identyczne z tymi, na których dokonywano pomiarów) przez określony czas, otrzymując kolejne, narastające wartości łącznego czasu szlifowania (t) i ubytku materiału (V_w).

Szczegółowy plan badań zamieszczono poniżej, w postaci algorytmu postępowania uproszczonego do prostego wypunktowania:

lp.	opis zabiegu lub operacji	uwagi, parametry, zasadnicze narzędzia, przyrządy
1.	założenie ściernic w oprawach	1. ściernice: J, M
		2. oprawy (2 szt.)
2.	wyrównoważenie statyczne ściernic	1. przyrząd do wyrównoważenia
	w przyrządzie do wyrównoważenia	2. obciążniki mas wyrównoważających
3.	zamocowanie ściernicy na szlifierce	1. wyrównoważona ściernica J lub M w oprawie
		2. klucz dynamometryczny
4.	zabieg uzdatniania czynnej powierzchni	1. obciągacz jednoziarnisty
	ściernicy (profilowanie połączone z ostrzeniem)	2. uchwyt obciągacza
		Parametry:
		$a_{d(J)} = 0.05 \text{ [mm]}, a_{d(M)} = 0.03 \text{ [mm]}, v_{fd} = 230 \text{ [mm/min]},$
		$v_{s(d)} = 18 \text{ [m/s]} (f = 25, 4 \text{ [Hz]} \text{ dla } d_s = 250 \text{ [mm]}),$
		$Q_{c(d)} = 0 \times 10^{-3} [\text{m}^3/\text{min}]$
5.	sprawdzenie drgań układu na biegu jałowym	1. czujnik drgań z przyssawką magnetyczną
		2. przyrząd pomiarowy
		Parametry: $v_s = 1 - 30 \text{ [m/s]}$
6.	zamocowanie próbek w uchwycie	1. próbki: 19×8×20 [mm] i 100×20×8 [mm]
	i na stole magnetycznym szlifierki	2. uchwyt obróbkowy do próbek i czujnika siły oraz czujnika
		emisji akustycznej
		3. siłomierz
		4. czujnik EA
		5. elementy połączeniowe
7.	wyrównanie powierzchni zamocowanych	Parametry:
	próbek (zabielenie próbek)	$a_e = 0,005 - 0,01 \text{ [mm]}, v_s = 18 \text{ [m/s]}, v_{ft} = 10 \text{ [m/min]},$
		$f_a = 0.3 \text{ [mm/skok]}, Q_c = 3 \times 10^{-3} \text{ [m^3/min]}$

Tab. 4.2.2. Uproszczony plan badań doświadczalnych

(verte ♦)

Tab. 4.2.2. (ciąg dalszy)

lp.	opis zabiegu lub operacji	uwagi, parametry, zasadnicze narzędzia, przyrządy
8.	zabieg ostrzenia ściernicy po zabieleniu próbek	1. obciągacz jednoziarnisty
		2. uchwył obciągacza Parametry:
		$a_{d(J)} = 0.05 \text{ [mm]}, a_{d(M)} = 0.03 \text{ [mm]}, v_{fd} = 230 \text{ [mm/min]},$
		$v_{s(d)} = 18 \text{ [m/s]} (f = 25, 4 \text{ [Hz]} \text{ dla } d_s = 250 \text{ [mm]}),$
0	zuzuwanie ściernicy (operacja szlifowania) do	$\underline{Q}_{c(d)} = 0 \times 10^{-5} \text{ [m^7/min]}$
9.	określonego momentu wyrażonego czasem jej	2. dodatkowa próbka 100×20×8 mm
	pracy	Parametry: $a_e = 0.03$ [mm], $v_s = 27.5$ [m/s] ($f = 37.8$ [Hz] dla
		$d_s = 250 \text{ [mm]}$, $v_{ft} = \{4, 14, 24\} \text{ [m/min]}, f_a = 0,3 \text{ [mm/skok]},$
10	szlifowanie próbli 19×8×20 mm w połaczeniu	$Q_c = 3 \times 10^{\circ} \text{[m^/min]}$
10.	z rejestracją wybranych wielkości wyjściowych	cji sygnałów)
	procesu: F_c , F_n , EA_{RMS}	2. karta pomiarowa z przetwornikiem A/C
		3. wielokanałowy wzmacniacz ładunku
		5. siłomierz
		6. czujnik emisji akustycznej
		Parametry: $a_e = 0.03$ [mm], $v_s = 27.5$ [m/s] ($f = 37.8$ [Hz] dla
		$a_s = 250 \text{ [mm]}$, $v_{ft} = \{4, 14, 24\} \text{ [m/min]}$, $f_a = 0.3 \text{ [mm/skok]}$, $Q = 3 \times 10^{-3} \text{ [m^3/min]}$
11.	pomiar zużycia ściernicy metoda wcinania żyletki	
	a) stworzenie bazy pomiarowej w postaci	1. obciągacz jednoziarnisty
	nacięcia obciągaczem (~1×0,05 mm) na	2. uchwyt obciągacza
	tylnej części obwodu ściernicy	Parametry: $a_d = 0.05$ [mm], $v_{s(d)} = 18$ [m/s] ($f = 25.4$ [Hz] dla
	b) odwzorowanie zarysu krawedziowego	$u_s = 2.50 \text{ [IIIIII]}, Q_{c(d)} = 0.810 \text{ [III / IIIII]}$ 1 żyletka
	czynnej powierzchni ściernicy	2. uchwyt stabilizująco-mocujący
		Parametry:
		$a_e = 0.20 \text{ [mm]}, f_a = 0 \text{ [mm/skok]}, v_s = 18 \text{ [m/s]} (f = 25.4 \text{ [Hz]})$ $dl_a d = 250 \text{ [mm]}, Q = 0 \times 10^{-3} \text{ [m^3/min]}$
12.	zdjęcie ściernicy i próbek ze szlifierki	1. klucze płaskie
13.	pomiar wybranych cech makro- i mikrogeometrii	ściernicy
	a) pomiar średnicy ściernicy	1. wysokościomierz
	b) pomiar profilu chropowatości CPS	1. profilometr
		2. igła profilometru do badań ściernic
		4 przetwornik A/C
		5. komputer PC klasy AT (z oprogramowaniem do akwizycji
		profilu chropowatości)
14.	określenie utraty zdolności skrawnej ściernicy	Jeżeli ściernica nadaje się do dalszej pracy, powrót do punktu 3. Jeżeli ściernica nie nadaje, to nastepuje jej wymiana lub zakoń-
	wierzchni obrabianych	czenie badań.
15.	pomiar profilu chropowatości powierzchni	1. profilometr
	szlifowanych próbek	2. igła profilometru do badań próbek
		4. komputer PC klasy AT (z oprogramowaniem do akwizycij
		chropowatości)
16.	obliczenie naprężeń w warstwie wierzchniej	1. elektrolizer (zbiornik do elektronicznego usuwania war-
	szlitowanych elementow za pomocą metody pomiaru odkształceń podczas ich elektrolitycz-	stwy wierzenniej) 2. układ mocowania
	nego trawienia	3. analogowy czujnik indukcyjny
		4. wskaźnik (miernik) czujnika indukcyjnego
		5. zespoi regulacji temperatury (czujnik termistorowy, grzałka elektryczna elektroniczny regulator)
		6. zespól regulacji stężenia (mieszadło)
		7. multiplekser, 8. centralny system sterowania
		9. rejestrator, 10. zasilacz prądu stałego
		Parametry:
		T = 20 [°C], $I = 4$ [A]

Wszystkie wyżej wymienione etapy powtarzano do momentu utraty zdolności skrawnej ściernicy, czyli do czasu pojawienia się uszkodzeń powierzchni obrabianych w postaci przypaleń szlifierskich.

Aby do wyników badań wprowadzić jak najmniejszą liczbę zmiennych czynników decydujących o błędach, do zabiegu zabielania próbek, czyli wyrównania ich powierzchni tuż po zamocowaniu na stole szlifierki, użyto tej samej ściernicy co do eksperymentów, ale szlifowano z posuwem poprzecznym o przeciwnym zwrocie z udziałem drugiej krawędzi ściernicy nie biorącej zasadniczego udziału w szlifowaniu właściwym, a jedynie służącej do wyiskrzania oraz stanowiącej bazę odniesienia w badaniach zużycia krawędziowego.

4.2.2. Techniki pomiarowe

Pomiary wartości wielkości wyjściowych procesu

Sygnały wyjściowe procesu rejestrowano przy użyciu specjalistycznych urządzeń firmy *Kistler Instrument Corp*. Siły szlifowania były mierzone na siłomierzu typu 9251A, natomiast sygnał emisji akustycznej rejestrowano czujnikiem typu 8152A2.

Wielkości analogowe były przetwarzane na postać cyfrową z wykorzystaniem mikrokomputera typu IBM PC klasy Pentium, który wyposażony został w kartę z przetwornikiem analogowo-cyfrowym typu DAS-1601 wyprodukowaną przez *Keithley Instruments, Inc.* Karta ta posiadała przetwornik 12 bitowy, pracowała w zakresie \pm 10 V i charakteryzowała się błędem przetwarzania $\delta R = \pm 0,0059$ V.

Wszystkie sygnały (o długości 1 lub 2 s w zależności od aktualnego posuwu v_{fl}) poddano akwizycji z częstotliwością f = 32000 Hz/kanał i zapisano w jednostkach napięcia (w zakresie ± 10 V) w plikach na dysku komputera, celem dalszej obróbki statystycznej. Wartości zostały zarejestrowane z dokładnością ± 0,001 V = ± 1 mV.

Sygnały pochodzące z siłomierza były przetwarzane w wielokanałowym wzmacniaczu ładunku typu 5019A. Nastawy wzmacniacza, które były zgodne z zaleceniami producenta zastosowanego siłomierza, przedstawiono w załączniku w tabeli Z.3.1.1. Wynikiem obciążenia siłomierza było wygenerowane napięcie w woltach. W celu przejścia na jednostkę SI, czyli Newtony, przeprowadzono cechowanie siłomierza (przeskalowanie wartości). Szczegółowy opis procedury cechownia zawarto w załączniku do niniejszej pracy w rozdziale Z.3.1.2.

Sygnał emisji akustycznej pochodzący ze strefy szlifowania, mierzono przy pomocy piezoelektrycznego czujnika EA pracującego w zakresie częstotliwości f = 100 - 900 kHz ze średnią czułością na fale powierzchniowe (*Rayleigha*) i podłużne na poziomie 48 dB_{ref 1Vs/m}. Czujnik emisji akustycznej przytwierdzono bezpośrednio do powierzchni próbki w odległości kilkunastu milimetrów od bezpośredniej strefy szlifowania, zapewniając tym samym jego optymalne rozmieszczenie. Sygnał emisji podlegał dodatkowo wzmocnieniu i odfiltrowaniu w konwerterze typu 5125A, który wyznaczał także wartość skuteczną emisji akustycznej (*EA*_{RMS}) w oparciu o stałą czasową $\tau_s = 0,12$ ms:

$$EA_{RMS} = \sqrt{\left(\tau_{s}\right)^{-1}} \int_{0}^{\tau_{s}} EA_{RAW}^{2}(t) dt \ \left[V\right].$$
(4.2.1)

Filtr dolno przepustowy (ang. *low pass*) ustawiono na 1000 kHz, natomiast górnoprzepustowy (ang. *high pass*) na 50 kHz. Dokładność pomiaru emisji akustycznej, dla użytego czujnika, według producenta wynosi $\delta EA = \pm 5\%$, natomiast wartość skuteczna EA_{RMS} , wyznaczana jest z dokładnością $\delta EA_{RMS} = \pm 3\%$ (ze względu na błąd przetwarzania sygnału przez konwerter typu 5125A).

Kontrola zmian geometrii czynnej powierzchni ściernicy

W trakcie właściwych badań eksperymentalnych mierzono zachodzące zmiany zarówno makro-, jak i mikrogeometrii czynnej powierzchni ściernicy. Z wielkości opisujących zmiany w skali makro, do oceny postępującego zużycia narzędzia wybrano:

- długość czynnej krawędzi ściernicy (B_{kr}) ,
- zużycie krawędziowe ściernicy (Δr_{kr}),
- kąt zużycia krawędziowego ściernicy (α_{kr}),
- długość zarysu czynnego ściernicy (l_D) ,
- zużycie promieniowe ściernicy (Δr_s)
- oraz starcie względne wzniesień profilu dla CPS (*l_{st}*).

Dodatkowo obliczono inne parametry charakteryzujące makrogeometrię czynnej powierzchni ściernicy:

- powierzchnia zużycia promieniowego (A_{sr}) ,
- powierzchnia zużycia krawędziowego ściernicy od strony natarcia (A_{kr}) ,
- całkowita powierzchnia zużycia krawędziowego ściernicy (A_{sk}),
- całkowita powierzchnia zużycia ściernicy (A_s) ,
- geometryczna długość styku (strefy szlifowania) (l_g) .

Zużycie promieniowe ściernicy mierzono z wykorzystaniem automatycznego wysokościomierza *TRIMOS VERTICAL* typu TVD 800A z kulkową końcówką pomiarową Ø 8 mm (TV-1.1). Pomiarów dokonano przy zakresie pomiarowym 525 mm z dokładnością odczytu 1 μm. Błąd maksymalny wysokościomierza dla pomiarów w całym zakresie pomiarowym wynosił 5 μm.

Pozostałe wielkości wyznaczono metodą pośrednią posługując się odwzorowaniami zarysów czynnej powierzchni ściernicy na żyletkach. W celu stworzenia bazy porównawczej, służącej jako odniesienie podczas pomiaru zmian zaokrąglenia ściernicy, w tylnej części obwodu ściernicy nacinano obciągaczem jednoziarnistym kanałek bazowy o głębokości 0,05 mm i długości około 1 mm. W czasie pomiaru ściernicę opuszczano w kierunku prostopadłym do jej osi, nacinając zarys krawędziowy w żyletce osadzonej w specjalnym uchwycie.

Z odwzorowanych na żyletkach profili ściernic, z wykorzystaniem systemu komputerowego do pomiaru odległości *Measuring Processor* MZ-3541, stosując powiększenie 50× na urządzeniu firmy *Schunk Werth Messtechnik GmbH*, wyposażonym w projektor typu OPTIMUS G, wyznaczono parametry zużycia krawędziowego ściernicy: długość czynnej krawędzi ściernicy (B_{kr}), zużycie krawędziowe ściernicy (Δr_{kr}), kąt zużycia krawędziowego ściernicy (α_{kr}) oraz długość zarysu czynnego ściernicy (l_D).

Wartości parametrów zużycia krawędziowego ściernicy wyznaczono z dokładnością $\pm 0,001$ mm, zarówno w kierunku pionowym, jak i w poziomym. Wynikało to z rozdzielczości, w jakiej pracował system do pomiaru odległości. Pomiary odwzorowanych profili wykonano przy użyciu funkcji do pomiaru odległości między dwoma punktami na krawędziach profilu (rys. 4.2.3). Badania przebiegały następująco:

- wypoziomowanie próbki względem osi projektora na podstawie odwzorowanej bazy pomiarowej,
- ustawienie sensora projektora w początkowym punkcie zużycia krawędziowego (jest to punkt na linii profilu, w którym rozpoczyna się odchyłka od poziomu) i wykonanie pomiaru położenia we współrzędnych x-y,

- ustawienie sensora projektora w końcowym punkcie zużycia krawędziowego i wykonanie pomiaru położenia we współrzędnych x-y, co jest równoważne z wykonanie przez program pomiaru odległości,
- wydruk wyników zmierzonych odległości x, y, c, które odpowiadają poszukiwanym wielkością geometrycznym: l_D , Δr_{kr} i B_{kr} .



Rys. 4.2.3. Schemat działania funkcji do pomiaru odległości między 2. punktami (a) oraz pomiar odwzorowanej krawędzi ściernicy wraz z przykładowym fragmentem wydruku z programu P184 zawierającym zmierzone odległości (b)

Natomiast zmiany mikrogeometrii CPS określono średnią długością starcia wierzchołków zarysu ziaren (l_{st}) oraz wybranymi parametrami profilu chropowatości:

- średnim odstępem miejscowych wzniesień profilu $(RS_{m(s)})$,
- średnią wartością wysokości wzniesień profilu (R_c),
- średnią arytmetyczną rzędnych profilu $(R_{a(s)})$,
- wysokością profilu chropowatości według 10 punktów (Rz),
- wariancją rzędnych wzniesień profilu na czynnej powierzchni ściernicy $(D^2_{(Z)})$
- oraz ilością wierzchołków ziaren na długości elementarnej (S_{st}) .

Profile wykonano przy pomocy profilometru *Carl Zeiss Jena* typu ME 10 (produkcji niemieckiej). Urządzenie wyposażono w igłę pomiarową TASTER 10S (413) produkcji *Carl Zeiss Jena* z diamentową końcówką igły wodzącej o kącie rozwarcia 90°. Promień krzywizny igły wodzącej wynosił $\leq 2 \mu m$.

Zdejmując profil ściernicy, przyjęto odcinek pomiarowy $l_{n(s)} = 10$ mm, krok próbkowania 40 ms, czas 100 s, prędkość przesuwu igły pomiarowej 100 µm/s oraz powiększenie pionowe 125×. Odcinek elementarny do wyznaczenia parametrów chropowatości, ze względu na oczekiwane wartości $R_{a(s)} > 10,0$ µm, wynosił $l_{r(s)} = 8,0$ mm.

Analiza starcia wierzchołków ziaren ściernicy

Do analizy starcia wierzchołków ziaren wykorzystany został program *TalyMap* Universal 3.1.10 (build 3410) angielskiej firmy *Taylor/Hobson Precision, Ltd.*, napisanany w kooperacji z firmą *Digital Surf*. Aplikacja ta jest dołączana przez producentów profilometrów i innych dokładnych urządzeń do pomiaru parametrów powierzchni, a przeznaczona do szerokich analiz struktury badanej powierzchni.

Wykorzystując funkcje w budowane w ten program, na podstawie wprowadzonych zarysów profili, wyznaczono starcie wierzchołków mierząc poziome odległości pomiędzy lewą i prawą stroną każdego wierzchołka przy jednoczesnym zachowaniu możliwie minimalnego odchylenia od poziomu (kąt nachylenia linii pomiarowej $< \pm 0,1^{\circ}$).

Procedura pomiaru składała się z 5 zasadniczych kroków i była następująca: wczytanie profilu do programu, wypoziomowanie profilu, progowanie do wierzchołków aktywnych, wybranie do analizy tylko części użytecznej profilu oraz pomiary starcia. Szczegółowy opis kolejnych kroków omawianej procedury pomiarowej zamieszczono w załączniku do niniejszej pracy w rozdziale Z.3.4.1. Ostatecznie starcie względne wzniesień profilu dla wierzchołków ziaren statycznych, obliczono korzystając z poniższej zależności:

$$I_{st} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{st}} l_{st(i)}}{N_{st}} \text{ [mm]}, \qquad (4.2.2)$$

gdzie: i – numer kolejnego wzniesienia profilu, dla którego liczono starcie,

 N_{st} – liczba ostrzy statycznych na określonej głębokości,

 $l_{st(i)}$ – starcie *i*-tego elementu profilu, odpowiadające odległości między daną parą słupków.

Wyniki wykonanych pomiarów zamieszczono w rozdziale poświęconym analizie zużycia mikrogeometrii czynnej powierzchni ściernicy w dalszej części niniejszej pracy (rozdz. 4.8.1, D107).

Pomiar naprężeń własnych w warstwie wierzchniej próbek

Ponieważ w wyniku oddziaływania narzędzia na przedmiot obrabiany w jego warstwie wierzchniej tworzy się określony stan naprężeń o wielkości, znaku i głębokości zalegania zależnym od wielu czynników, w tym przede wszystkim od intensywności oddziaływań mechanicznych i cieplnych, w przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych wyznaczono wielkości charakteryzujące stan warstwy wierzchniej, czyli zmienne cechy fizycznochemiczne w stosunku do materiału rdzenia, w postaci naprężeń własnych w skali makronaprężeń (naprężenia pierwszego rodzaju, [Kel1963]).

Do wyznaczenia tych naprężeń wykorzystano metodę Waissmana-Phillipsa dla próbek płaskich, jednostronnie zamocowanych. Metoda polega na pomiarze odkształceń próbki (pomiarze strzałki ugięcia swobodnego końca) podczas relaksacji naprężeń w trakcie usuwania, poprzez trawienie elektrolityczne, kolejnych stref warstwy wierzchniej. Ponadto, w metodzie tej zakłada się, że naprężenia zmieniaja się tylko w kierunku jednej z osi symetrii przekroju belki pryzmatycznej (próbki płaskiej).

Metoda ta, a także zależności, funkcje i algorytm obliczeń pozwalających na określenie wartości naprężeń zalegających w kolejnych warstwach powierzchni próbek, zostały bardzo szczegółowo opisane w pracy [PliS1986].

Badając naprężenia, zdecydowano się wybrać tylko te próbki, które odpowiadały charakterystycznym punktom pracy ściernicy. Punkty te określono na podstawie analizy sygnałów wyjściowych procesu, oraz zmieniającej się geometrii ściernicy. Pomiary naprężeń wykonano po zakończeniu wszystkich serii badań.

Stanowisko badawcze oraz schemat postępowania były typowe dla przyjętej metody pomiarowej, dlatego szczegółowy opis warunków badań naprężeń warstwy wierzchniej przedstawiono w załączniku do pracy (rozdz. Z.3.4.2).

Ocena mikrostruktury szlifowanych przedmiotów

Chropowatość powierzchni szlifowanych próbek opisano wyznaczając profil zarysu powierzchni próbki w kierunku porzecznym do śladów obróbki. Przyjęto odcinek pomiarowy $l_{n(w)} = 4$ mm, krok próbkowania 20 ms, czas 40 s oraz prędkość przesuwu igły 100 µm/s. Powiększenie pionowe wynosiło 10.000×. Odcinek elementarny do wyznaczenia parametrów

chropowatości wynosił $l_{r(w)} = 0.8$ mm (i był dobrany ze względu na przewidywane wartości parametru $R_{a(w)} > 0.10 \mu$ m).

Do tego celu, podobnie jak przy wyznaczaniu profilu powierzchni ściernicy, wykorzystano profilometr *Carl Zeiss Jena* typu ME 10 (Niemcy). Profilometr wyposażono w igłę pomiarową TASTER 8 (2378) produkcji *Carl Zeiss Jena* z diamentową końcówką igły wodzącej o kącie rozwarcia 90°. Promień krzywizny igły wodzącej wynosił $\leq 2 \mu m$.

Parametry chropowatości powierzchni po szlifowaniu wybrano wg zaleceń doboru parametrów SGP (struktura geometryczna powierzchni) zawartych w pracy [Now1991]. I tak, za wskaźniki jakościowe otrzymywanych powierzchni szlifowanych przyjęto poniższe wielkości charakteryzujące mikrogeometrię powierzchni przedmiotów obrabianych:

- średnia arytmetyczna rzędnych profilu: $R_{a(w)}$,
- średni odstęp miejscowych wzniesień profilu: $RS_{m(w)}$,
- wartość średnich kwadratowych miejscowych wzniosów profilu: Δq ,
- średnia wartość promienia zaokrąglenia wierzchołków profilu, r_{ws} ,
- względna długość profilu (do oceny rzeczywistej długości profilu), L₀,
- wartość udziału materiałowego profilu dla poziomu przecięcia profilu c = 20: Rmr_{20} ,
- udział strefy wierzchołkowej (ang. *top zone*) w SCGC: T_z ,
- udział strefy roboczej (ang. working zone) w SCGC: W_z,
- udział strefy quasi nominalnej (ang. quasi-nominal zone) w SCGC: QNz.

Analizę udziału nośnego ($t_p \equiv Rmr$) profilu szlifowanych powierzchni prowadzono z wykorzystaniem Symetrycznej Krzywej Geometrycznego Styku (ang. *Symmetrical Curve of Geometrical Contact*). Metoda ta opracowana została przez prof. J. Kaczmarka i opisana oraz zweryfikowana w wielu pracach, m.in. w [Kac1999].

4.2.3. Badania rozpoznawcze

Wszystkie badania rozpoznawcze i pomiary z nimi związane, wykonano na stanowiskach tożsamych z badaniami właściwymi. Stanowiska te, w tym charakterystykę wykorzystanych urządzeń, opisano w dalszej części pracy.

W badaniach rozpoznawczych szlifowano próbki wykonane ze stali narzędziowej NC10 (60 ± 2) HRC ($100 \times 20 \times 8$ mm) miękką ściernicą elektrokorundową wykonaną w *Fabryce Narzędzi Ściernych* w Grodzisku Mazowieckim oznaczoną symbolem wg [N01/603-4]: PN-ISO 603-4:2001 - 1 - 250x32x98 - 99A 60 J 7 V - 42m/s.

Ze względu na rozległość postawionych zadań i prac z nimi związanych, badania rozpoznawcze podzielono na etapy:

- wyznaczenie niezbędnej liczby powtórzeń, przy założonej ich powtarzalności,
- badanie istotności współczynników wejściowych,
- etap badań, którego wyniki stanowiły o doborze parametrów i zakresie badań właściwych miał na celu określenie istnienia zależności pomiędzy obciążeniem ściernicy, a wyjściowymi wielkościami procesu szlifowania,
- wstępne określenie zależności pomiędzy chropowatością powierzchni szlifowanej, a wartością skuteczną EA oraz składowymi siły szlifowania.

Ustalenie liczby powtórzeń

Ustalenie koniecznej liczby powtórzeń w badaniach eksperymentalnych, czyli liczebności próby, jest istotne ze względu na konieczność ograniczenia obserwowanych osobników populacji. Powodem są ograniczenia nakładów (kosztów i czasu) jakie można przeznaczyć na badania, dyskusyjność przydatności wyników jednostkowych oraz często brak dostępności do wszystkich osobników populacji [Bar1982].

Wszystkie powyższe ograniczania nie pozwalaja na przebadanie całej populacji, dlatego konieczny jest taki dobór próby, aby zachować odpowiednie proporcje między precyzją badań, a ich kosztami. Ponadto, próba musi być tak dobrana, aby być próba reprezentatywną, czyli powinna pozwolić otrzymać takie estymatory charakterystyk populacji, które możemy oczekiwać przy nałożonych nakładach [Bar1982].

Ponieważ ze wzrostem liczebności próby, rośnie koszt i czas realizacji badań, istnieje pewna graniczna ilość powtórzeń (n) badań eksperymentalnych, która stanowi kompromis pomiędzy ww. czynnikami i nie należy jej przekraczać. W literaturze podawane są różne zalecane zakresy: $1 \le n \le 6$ [Pol1984] oraz $n \ge 3$ lub $n \ge 5$ [Gor1998].

W badaniach zdecydowano się na dobór liczebności próby wykorzystując metodę opisaną w pracy [Bar1982]. W metodzie tej, ustalając z góry precyzję estymacji (d), wymaganą wielkość próby można obliczyć ze wzoru:

$$n \ge n_0 \left(1 + \frac{n_0}{N}\right)^{-1},$$
(4.2.3)

$$n_0 = S^2 / V , (4.2.4)$$

$$V = \left(\frac{d}{t_{kr}}\right)^2,\tag{4.2.5}$$

gdzie: n – szukana liczebność próby (liczba pomiarów),

- n_0 pierwsze przybliżenie wymaganej liczby pomiarów, N liczba elementów populacji,
- S^2 wartość wariancji rozpatrywanej cechy,
- d przyjęta precyzja estymacji (jest to pewna ustalona wartość, która jest mniejsza od bezwzględnej wartości z różnicy średnich populacji i próby),
- tkr wartość krytyczna rozkładu t-Studenta przy N 1 stopniach swobody i zadanym poziomie istotności statystycznej α .

W przeprowadzonych badaniach, głównym kryterium oceniającym proces było zużycie ściernicy, wyrażone wybranymi parametrami opisującymi CPS oraz sygnałami wyjściowymi procesu, dlatego też przy ustalaniu ilości powtórzeń pod uwagę wzięto następujące parametry:

- zużycie krawędziowe ściernicy: Δr_{kr} , _
- powierzchnię zużycia krawędziowego ściernicy od strony natarcia: A_{kr} , _
- starcie względne wzniesień profilu (dla wierzchołków ziaren aktywnych): l_{st} , _
- średnią elementarną głębokość szlifowania: a_{zsr} ,
- wskaźnik zdolności skrawnej czynnej powierzchni ściernicy: K_{CPS},
- średnią wartość wysokości wzniesień profilu: R_c ,
- średni odstęp miejscowych wzniesień profilu, RS_m , —
- wartość skuteczną sygnału emisji akustycznej: *EA_{RMS}*. _

W badaniach przeanalizowano 1 punkt pomiarowy pracy ściernicy równy dwóm przejściom ściernicy nad próbką NC10 (60 ± 2) HRC (100×20×8 mm), co odpowiada ubytkowi materiału $V_w = 120 \text{ mm}^3$. Po każdej próbie, odnawiano czynną powierzchnię ściernicy w zabiegu obciagania.

Ustalając ilość eksperymentów dla badań właściwych, dla każdego z wybranych do tego celu parametrów wyznaczono oddzielnie minimalna liczbe powtórzeń n, przeprowadzając N = 20 prób, przyjmując arbitralnie precyzję estymacji d = 5 % oraz poziom istotności statystycznej $\alpha = 0.05$ (95% pewności).

Badania wykonano bez powtórzeń. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów i wnioski z ich analizy zamieszczono w dalszej części pracy.

Dobór parametrów i zakresu badań właściwych

Kolejny etap badań rozpoznawczych miał na celu określenie istnienia zależności pomiędzy parametrami obróbki (decydującymi o potencjale skrawnym ściernicy), a mierzonymi sygnałami wyjściowymi procesu szlifowania. Wyniki tych badań miały stanowić wstępną ocenę przydatności metody pomiaru emisji akustycznej do monitorowania procesu szlifowania oraz określić zgrubnie korelację wartości RMS sygnału emisji akustycznej z chropowatością powierzchni szlifowanego przedmiotu wyrażoną najczęściej stosowanym parametrem, jakim jest średnia arytmetyczna wysokość rzędnych profilu (R_a). Ponadto, wyniki badań rozpoznawczych stanowiły o doborze parametrów i zakresie badań właściwych.

Zgodnie z zaleceniami podanymi w pracy [OP1986], badania rozpoznawcze przeprowadzono z prędkościami obwodowymi ściernicy odpowiednimi dla szlifowania płaszczyzn: $v_s = \{25, 27, 5, 30, 32, 5, 35\}$ m/s. Zastosowano też pełen przekrój wartości prędkości posuwu wzdłużnego: $v_{ft} = \{4, 9, 14, 19, 24\}$ m/min oraz różne wartości styku roboczego (głębokości szlifowania): $a_e = \{0,01, 0,02, 0,03, 0,04\}$ mm.

W tej części badań rozpoznawczych wykonano testy, których celem było zbadanie istotności wpływu poszczególnych czynników wejściowych na czynnik wyjściowy oraz eksperymenty, których realizacja pozwoliła wyznaczyć modele matematyczne opisujące badane obiekty. Dlatego też, tworząc plan badań rozpoznawczych, zdecydowano się dobrać parametry obróbki na podstawie planu eksperymentu, którym był plan statyczny randomizowany, oparty na prostokącie *Youdena* (SPRYR - *Static Program Randomised Youden's Rectangle*).

plan	czynniki wejściowe (ang. <i>input factors</i>)	czynnik wynikowy (ang. <i>result factor description</i>)
1.	$v_s = \{25, 27, 5, 30, 32, 5, 35\}$ [m/s] $v_{ft} = \{4, 9, 14, 19, 24\}$ [m/min] $a_e = \{0, 01, 0, 02, 0, 03, 0, 04\}$ [mm]	<i>R_{a(w)}</i> [μm]
2.	$v_s = \{25, 27, 5, 30, 32, 5, 35\}$ [m/s] $v_{ft} = \{4, 9, 14, 19, 24\}$ [m/min] $a_e = \{0, 01, 0, 02, 0, 03, 0, 04\}$ [mm]	EA_{RMS} [V]
3.	$v_s = \{25, 27, 5, 30, 32, 5, 35\} [m/s]$ $v_{ft} = \{4, 9, 14, 19, 24\} [m/min]$ $a_e = \{0, 01, 0, 02, 0, 03, 0, 04\} [mm]$	F_c [V]
4.	$v_s = \{25, 27, 5, 30, 32, 5, 35\} [m/s]$ $v_{ft} = \{4, 9, 14, 19, 24\} [m/min]$ $a_e = \{0,01, 0,02, 0,03, 0,04\} [mm]$	$F_n[V]$

Tab. 4.2.3. Czynniki wejściowe i wyjściowe procesu dobrane do planu eksperymentu

Plan ten wybrano, ponieważ przy jego pomocy możliwe jest jednoczesne badanie istotności wpływu trzech czynników wejściowych na badany obiekt [Kuk2000, Kuk2002]. W trakcie badań rozpoznawczych mierzono następujące wielkości wyjściowe procesu, dla których utworzono 4 oddzielne plany eksperymentu (tab. 4.2.3, D60):

- składową normalną siły szlifowania (F_n) ,
- składową styczną siły szlifowania (F_c),
- sygnał emisji akustycznej w postaci wartości skutecznej (EA_{RMS}),
- chropowatość powierzchni szlifowanej wyrażona parametrem $(R_{a(w)})$.

Ponieważ w planie typu SPRYR czynniki mogą mieć nieznaną istotność (ang. *signi-ficance*), wszystkie podane czynniki wejściowe nie mały z góry określonej istotności. Mogą to być zarówno czynniki wpływające na czynnik wynikowy, jak również nieistotne.

Ponieważ wykonano 3 równorzędne pomiary, a niektóre wyniki mogą statystycznie odbiegać od pozostałych, dokonano także sprawdzenia wyników pomiarów pod względem występowania błędów i eliminacji wielkości obarczonych błędem grubym. Do tego celu zastosowano statystyki: Grubasa, B_4^+ oraz B_6^+ [Kuk2000, Kuk2002].

Liczba poziomów dla poszczególnych czynników ustalana jest na podstawie rozmiaru prostokąta *Youdena*. W badaniach zastosowano rozmiar 5×5×4. Natomiast dokładność badań (ang. *research precision*) ustalono arbitralnie, przyjmując:

- liczbę powtórzeń pomiarów w doświadczeniu (ang. replicates): 3,
- poziom istotności (ang. *inconfidence level*): α = 0,05 (wszystkie analizy wykonywane w ramach niniejszej pracy, zarówno w badaniach wstępnych, jak i właściwych opierają się o powyżej przyjętą wartość poziomu istotności).

Przyjmując hipotezę, że występujące zależności pomiędzy czynnikami wejściowymi a wyjściowymi procesu nie mają najprostszej postaci, czyli nie są opisane funkcją liniową, do planowania eksperymentów właściwych przyjęto plan pięciopoziomowy kompozycyjny rotatabilny (5LRotExp – z ang. 5 Levels Rotary Composite Experiment), który umożliwia identyfikację obiektów nieliniowych opisywanych funkcją drugiego lub trzeciego stopnia [Kuk2000, Kuk2002]. Eksperyment zaplanowano przy pomocy programu Experiment Planner w wersji 1.0.1 (autorstwa Sławomira Kukiełki), który został wykonany w ramach pracy dyplomowej w Katedrze Maszyn Roboczych Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. Kolejne etapy zrealizowanego planu eksperymentów rozpoznawczych, których celem było określenie zakresu badań poprzez zbadanie zależności parametru chropowatości $R_{a(w)}$ powierzchni poddanej obróbce szlifowaniem od wybranych parametrów obróbki (v_s , v_{ft} , a_e) przedstawiono w załączniku do pracy (rozdz. Z.3.5.5).

Wyniki eksperymentów, wykonanych w ramach badań wstępnych, czyli rezultaty określające statystyczną istotność wpływu czynników wejściowych na czynniki wyjściowe procesu szlifowania oraz postać modelu matematycznego opisującego badany obiekt, zestawiono w dalszej części pracy poświęconej wynikom badań (rozdz. 4.6, D83).

4.2.4. Badania właściwe

Badania właściwe obejmowały proces obwodowego szlifowania płaszczyzn oraz wyznaczenie wybranych parametrów CPS i powierzchni przedmiotu obrabianego ściernicami:

- PN-ISO 603-4:2001 1 250x32x98 99A 60 J 7 V 42m/s,
- PN-ISO 603-4:2001 1 250x32x98 99A 60 M 7 V 42m/s.

Materiałem obrabianym były prostopadłościenne próbki ze stali hartowanej:

- NC10 (60 ± 2) HRC (19×8×20 mm) próbki wykorzystywane do mierzenia i rejestracji wyjściowych wielkości procesu,
- NC10 (60 ± 2) HRC (100×20×8 mm) próbki zastosowane do przyspieszonego zużywania czynnej powierzchni ściernicy oraz do pomiarów zmian zachodzących w warstwie wierzchniej próbek.

Wyznaczając geometrię czynnej powierzchni ściernicy, a także określając jej postępujące zużycie, dokonano pomiarów i wyznaczenia parametrów odnoszących się do:

- chropowatości profili ściernicy:
 - średni odstęp miejscowych wzniesień profilu: $RS_{m(s)}$,
 - średnia wartość wysokości wzniesień profilu: *R_c*,
 - średnia arytmetyczna rzędnych profilu: $R_{a(s)}$,
 - wysokość profilu chropowatości według 10 punktów: R_z ,
 - wariancja rzędnych wzniesień profilu na czynnej powierzchni ściernicy: $D^2_{(Z)}$,
 - liczba wierzchołków ziaren (ostrzy) statycznych na jednostkę długości: S_{st} ,
 - starcia wierzchołków ziaren ściernicy (dla wierzchołków ziaren aktywnych):
 - suma starcia wzniesień profilu: l_s ,
 - starcie względne wzniesień profilu: l_{st} ,
- zużycia krawędziowego ściernicy:
 - długość czynnej krawędzi ściernicy (dł. zużycia krawędziowego): B_{kr},
 - zużycie krawędziowe ściernicy: Δr_{kr} ,
 - długość zarysu czynnego ściernicy: *l*_D,
 - kąt zużycia krawędziowego ściernicy: α_{kr} ,
 - powierzchnia zużycia krawędziowego ściernicy od strony natarcia: Akr,
 - całkowita powierzchnia zużycia krawędziowego ściernicy: Ask,
- zużycia promieniowego ściernicy:
 - zużycie promieniowe ściernicy: Δr_s ,
 - powierzchnia zużycia promieniowego: A_{sr},
 - geometryczna długość styku (strefy szlifowania) z przedmiotem: l_g ,
- zużycia całkowitego ściernicy:
 - całkowita powierzchnia zużycia ściernicy: A_s ,
- grubości warstwy skrawanej jednym ziarnem:
 - średnia elementarna głębokość szlifowania: *a_{zsr}*.

Dodatkowo wyznaczono:

- wskaźniki makrozużycia ściernicy:
 - zużycie objętościowe ściernicy: V_s ,
 - wskaźnik szlifowania: G,
 - wskaźnik zużycia: W_G ,
 - średnią właściwą szybkość promieniowego zużycia objętościowego: Z'sr,
 - oraz wskaźniki zdolności skrawnej ściernic:
 - wskaźnik zdolności skrawnej czynnej powierzchni ściernicy: K_{CPS}.

Określając zmiany fizyczno-chemiczne następujące w materiale przedmiotu obrabianego, zdecydowano się na określenie zmian mikrogeometrii powierzchni szlifowanej oraz wyznaczenie naprężeń zalegających w warstwie wierzchniej, wykorzystując do tego celu następujące parametry:

- dla chropowatości profili próbek (dobrane na podstawie zaleceń wg [Now1991]):
 - średnia arytmetyczna rzędnych profilu: $R_{a(w)}$,
 - średni odstęp miejscowych wzniesień profilu: $RS_{m(w)}$,
 - wartość średnich kwadratowych miejscowych wzniosów profilu: Δq ,
 - średnia wartość promienia zaokrąglenia wierzchołków profilu: r_{ws} ,
 - względna długość profilu (ocena rzeczywistej długości profilu): L₀,
 - wartość udziału materiałowego profilu dla poziomu przecięcia profilu c = 20: Rmr_{20} ,
 - udział strefy wierzchołkowej w SCGC: T_z ,
 - udział strefy roboczej w SCGC: W_z ,
 - udział strefy quasi nominalnej w SCGC: QN_z,

- dla naprężeń zalegających w warstwie wierzchniej:
 - całkowity czasy trawienia próbek: t_{tr} ,
 - zarejestrowane strzałki ugięcia: Δf ,
 - długość odcinka trawionego: l_{tr} ,
 - długość ramienia pomocniczego w układzie do mierzenia strzałki ugięcia: l_a ,
 - szerokości próbek: $b_{(w)}$,
 - wysokość (grubość) próbek przed trawieniem: $h_{(w)}$,
 - całkowita długość próbek: $l_{(w)}$,
 - początkowa (przed trawieniem) masa próbek: m₁, g,
 - końcowa (po trawieniu) masa próbek: *m*₂, g.

Objętości warstwy materiału zdejmowanej w wyniku przejścia ściernicy w przejściu pełnym i jednostkowym (za przejście jednostkowe przyjęto zebranie materiału o grubości a_e i szerokości f_a , natomiast przejście pełne ściernicy to zebranie materiału o grubości a_e na całej powierzchni próbki) dla zastosowanych w badaniach wartości styku roboczego i posuwu osiowego były następujące:

$$V_w = l_{(w)} \cdot a_e \cdot f_a \left[\text{mm}^3 \right]. \tag{4.2.6}$$

Tab. 4.2.4. Objętość warstwy zdejmowana w jednym przejściu

oznaczenie materiału próbki	przejście jednostkowe	przejście pełne		
	$V_w [\mathrm{mm}^3]$			
NC10 60 (+/-2) HRC (19x8x20 mm)	0,171	4,56		
NC10 60 (+/-2) HRC (100x20x8 mm)	0,9	60,0		

Wyznaczając czasy pracy ściernicy, obliczono czas potrzebny ściernicy na przejście jednostkowe i pełne (rozumiane jak wyżej) przy różnych nastawach obróbki, otrzymując wartości zawarte w poniższej tabeli:

		czas, t [s]							
oznaczonia próbli	ilość przejść	jść przejście jednostkowe przejście pełne							
oznaczenie probki	wych, [szt.]	<i>v_{ft}</i> , [m/min]							
		4	14	24	4	14	24		
NC10 60 (+/-2) HRC (19x8x20 mm)	26,66667	0,285	0,081429	0,0475	7,6	2,17143	1,26667		
NC10 60 (+/-2) HRC (100x20x8 mm)	66,66667	1,5	0,42857	0,25	100,0	28,57143	16,66667		

Pomiarów dokonywano w różnych odstępach czasu, równym wybranej ilości przejść ściernicy nad powierzchnią próbki w zależności od twardości ściernicy i zastosowanego posuwu wzdłużnego. W badaniach zastosowano poniższe punkty czasowe:

- dla ściernicy 99A60J7V:

Tab. 4.2.6. Czasy kontaktu ściernicy J z próbką i ubytek materiału V_w dla v_{ft} = 4 m/min

	ilość przejść ś	ciernicy, [szt.]	czas kont	aktu ścierni	cy, t [s]	ubytek materiału, V_w [mm ³]			
l.p.	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	łączny:	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	łączny:	
	(100×20×8 mm)	(19×8×20 mm)	(100×20×8 mm)	(19×8×20 mm)		(100×20×8 mm)	(19×8×20 mm)		
1.	0	2,5	0	19	19	0	11,4	11,4	
2.	1	1,5	100	11,4	111,4	60	6,84	66,84	
3.	2	1,5	200	11,4	211,4	120	6,84	126,84	

(verte •)

	ilość przejść ś	ciernicy, [szt.]	czas kontaktu ściernicy, t [s]			ubytek materiału, V_{w} [mm ³]		
l.p.	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	łączny:	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	łączny:
4	(100×20×8 mm) 3	(19×8×20 mm) 1 5	(100×20×8 mm) 300	(19×8×20 mm) 11 4	311.4	(100×20×8 mm) 180	(19×8×20 mm) 6 84	186 84
5.	4	1,5	400	11,4	411,4	240	6,84	246,84
6.	5	0,5	500	3,8	503,8	300	2,28	302,28
7.	7	1,5	700	11,4	711,4	420	6,84	426,84
8.	8	3,5	800	26,6	826,6	480	15,96	495,96
9.	10	1,5	1000	11,4	1011,4	600	6,84	606,84

Tab. 4.2.6. (ciąg dalszy)

Tab. 4.2.7. Czasy kontaktu ściernicy J z próbką i ubytek materiału V_w dla v_{ft} = 14 m/min

	ilość przejść ściernicy, [szt.]		czas kon	taktu ścierni	cy, <i>t</i> [s]	ubytek materiału, V_w [mm ³]		
l.p.	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	łączny:	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	łączny:
	(100×20×8 mm)	(19×8×20 mm)	(100×20×8 mm)	(19×8×20 mm)		(100×20×8 mm)	(19×8×20 mm)	
1.	0	1,5	0	3,2571	3,2571	0	6,84	6,84
2.	1	1,5	28,5714	3,2571	31,8286	60	6,84	66,84
3.	2	1,5	57,1429	3,2571	60,4	120	6,84	126,84
4.	3	2,5	85,7143	5,4286	91,1429	180	11,4	191,4
5.	4	1,5	114,286	3,2571	117,5429	240	6,84	246,84
6.	5	1,5	142,8571	3,2571	146,1143	300	6,84	306,84
7.	6	1,5	171,4286	3,2571	174,6857	360	6,84	366,84
8.	7	2,5	200	5,4286	205,4286	420	11,4	431,4
9.	8	2,5	228,5714	5,4286	234	480	11,4	491,4
10.	10	1,5	285,7143	3,2571	288,9714	600	6,84	606,84
11.	12	1,5	342,8571	3,2571	346,1143	720	6,84	726,84
12.	14	1,5	400	3,2571	403,2571	840	6,84	846,84
13.	15	2,5	428,5714	5,4286	434	900	11,4	911,4
14.	18	1,5	514,2857	3,2571	517,5429	1080	6,84	1086,84

Tab. 4.2.8. Czasy kontaktu ściernicy J z próbką i ubytek materiału V_w dla v_{fl} = 24 m/min

	ilość przejść ściernicy, [szt.]			ntaktu ściern	icy, <i>t</i> [s]	ubytek materiału, V_w [mm ³]		
l.p.	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	łączny:	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	łączny:
	(100×20×8 mm)	(19×8×20 mm)	(100×20×8 mm)	(19×8×20 mm)		(100×20×8 mm)	(19×8×20 mm)	
1.	0	1,5	0	1,9	1,9	0	6,84	6,84
2.	1	1,5	16,6667	1,9	18,5667	60	6,84	66,84
3.	2	1,5	33,33()	1,9	35,233()	120	6,84	126,84
4.	3	1,5	50	1,9	51,9	180	6,84	186,84
5.	4	1,5	66,6667	1,9	68,5667	240	6,84	246,84
6.	8	1,5	133,33()	1,9	135,233 ₍₎	480	6,84	486,84
7.	12	1,5	200	1,9	201,9	720	6,84	726,84
8.	16	1,5	266,6667	1,9	268,5667	960	6,84	966,84
9.	19	2,5	316,6667	3,1667	319,833()	1140	11,4	1151,4

- dla ściernicy 99A60M7V:

Tab. 4.2.9. Czasy kontaktu ściernicy M z próbką i ubytek materiału V_w dla v_{ft} = 4 m/min

	ilość przejść ściernicy, [szt.]		czas kontaktu ściernicy, t [s]			ubytek materiału, V _w [mm ³]		
l.p.	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	łączny:	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	łączny:
	(100×20×8 mm)	(19×8×20 mm)	(100×20×8 mm)	(19×8×20 mm)		(100×20×8 mm)	(19×8×20 mm)	
1.	0	1,5	0	11,4	11,4	0	6,84	6,84
2.	1	1,5	100	11,4	111,4	60	6,84	66,84
3.	2	1,5	200	11,4	211,4	120	6,84	126,84

	ilość przejść ś	ciernicy, [szt.]	czas kor	czas kontaktu ściernicy, <i>t</i> [s]			ubytek materiału, V_w [mm ³]		
l.p.	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	łaczny:	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	łaczny:	
	(100×20×8 mm)	(19×8×20 mm)	(100×20×8 mm)	(19×8×20 mm)		(100×20×8 mm)	(19×8×20 mm)		
1.	0	1,5	0	3,2571	3,2571	0	6,84	6,84	
2.	1	1,5	28,5714	3,2571	31,8286	60	6,84	66,84	
3.	2	2,5	57,1429	5,4286	62,5714	120	11,4	131,4	
4.	3	1,5	85,7143	3,2571	88,9714	180	6,84	186,84	
5.	4	2,5	114,2857	5,4286	119,714	240	11,4	251,4	
6.	5	1,5	142,8571	3,2571	146,114	300	6,84	306,84	
7.	6	2,5	171,4286	5,4286	176,8571	360	11,4	371,4	
8.	8	1,5	228,5714	3,2571	231,8286	480	6,84	486,84	
9.	10	2,5	285,7143	5,4286	291,1429	600	11,4	611,4	
10.	12	1,5	342,8571	3,2571	346,1143	720	6,84	726,84	
11.	14	2,5	400	5,4286	405,4286	840	11,4	851,4	
12.	16	2,5	457,1429	5,4286	462,5714	960	11,4	971,4	
13.	18	3,5	514,2857	7,6	521,8857	1080	15,96	1095,96	
14.	20	4,5	571,4286	9,7714	581,2	1200	20,52	1220,52	
15.	22	2,5	628,5714	5,4286	634	1320	11,4	1331,4	
16.	24	1,5	685,7143	3,2571	688,9714	1440	6,84	1446,84	

Tab. 4.2.10. Czasy kontaktu ściernicy M z próbką i ubytek materiału V_w dla v_{ft} = 14 m/min

Tab. 4.2.11. Czasy kontaktu ściernicy M z próbką i ubytek materiału V_w dla v_{ft} = 24 m/min

	ilość przejść ściernicy, [szt.]		czas kontaktu ściernicy, t [s]			ubytek materiału, V _w [mm ³]		
l.p.	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	łączny:	NC10 60±2HRC	NC10 60±2HRC	łączny:
	(100×20×8 mm)	(19×8×20 mm)	(100×20×8 mm)	(19×8×20 mm)	1.0	(100×20×8 mm)	(19×8×20 mm)	6.0.1
<u> </u>	0	1,5	0	1,9	1,9	0	6,84	6,84
2.	1	1,5	16,6667	1,9	18,5667	60	6,84	66,84
3.	2	1,5	33,33 ₍₎	1,9	35,233 ₍₎	120	6,84	126,84
4.	3	1,5	50	1,9	51,9	180	6,84	186,84
5.	4	1,5	66,6667	1,9	68,5667	240	6,84	246,84
6.	6	4,5	100	5,7	105,7	360	20,52	380,52
7.	8	1,5	133,33 ₍₎	1,9	135,233 ₍₎	480	6,84	486,84
8.	10	1,5	166,6667	1,9	168,5667	600	6,84	606,84
9.	12	1,5	200	1,9	201,9	720	6,84	726,84
10.	14	1,5	233,33()	1,9	235,233()	840	6,84	846,84
11.	16	2,5	266,6667	3,1667	269,833 ₍₎	960	11,4	971,4
12.	18	2,5	300	3,1667	303,1667	1080	11,4	1091,4
13.	20	1,5	333,33 ₍₎	1,9	335,233 ₍₎	1200	6,84	1206,84
14.	22	2,5	366,6667	3,1667	369,833 ₍₎	1320	11,4	1331,4
15.	24	1,5	400	1,9	401,9	1440	6,84	1446,84
16.	26	2,5	433,33()	3,1667	436,5	1560	11,4	1571,4
17.	28	1,5	466,6667	1,9	468,5667	1680	6,84	1686,84
18.	30	1,5	500	1,9	501,9	1800	6,84	1806,84

Eksperymenty w ramach badań właściwych przeprowadzono przy różnej wydajności objętościowa szlifowania Q_w , zależnej do parametrów obróbki:

$$Q_{w} = \frac{V_{w}}{t} = v_{ft} \cdot a_{e} \cdot f_{a} \; [\text{mm}^{3}/\text{s}]. \tag{4.2.7}$$

Tab. 4.2.12. Wartości wydajności objętościowej szlifowania dla przyjętych prędkości posuwu wzdłużnego w badaniach właściwych

parametr	wartość				
v _{ft} [m/min]	4	14	24		
$Q_w [\mathrm{mm}^3/\mathrm{s}]$	0,6	2,1	3,6		

Zakres przyjętych parametrów stanowi ograniczenia na jakie zdecydowano się tworząc plan eksperymentów, a wynikły one z analizy rezultatów badań wstępnych, które zamieszczono w rozdziale 4.6 (B83) niniejszej pracy.

Wykonano 3 powtórzenia badań eksperymentalnych dla tych samych warunków pracy ściernicy, co także wynikało z ustaleń na etapie prac rozpoznawczych.

4.3. Stanowisko badawcze

Badania doświadczalne, zarówno rozpoznawcze, jak i właściwe, przeprowadzono budując tory pomiarowe wykorzystując do tego celu gotowe maszyny, podzespoły, części i urządzenia pomiarowe będące na wyposażeniu Katedr wchodzących w skład Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. W badaniach wykorzystano, także samodzielnie zaprojektowane i wykonane elementy brakujące, takie jak uchwyty, podstawy i elementy elektroniczne. Dodatkowo, przeprowadzenie akwizycji sygnałów pochodzących ze strefy obróbki do postaci danych cyfrowych zapisanych na dysku twardym komputera, wymagało zaprojektowania i napisania specjalistycznego oprogramowania w oparciu o specjalistyczne środowiska programistyczno-obliczeniowe.

4.3.1. Stanowisko do pomiaru siły szlifowania i emisji akustycznej

Badania eksperymentalne przeprowadzono na uniwersalnej szlifierce do płaszczyzn produkcji rosyjskiej typu OC3, model 3711. Podstawowe parametry szlifierki, to:

- szybkość wzdłużnego przesuwu stołu: 3 25 m/min,
- automatyczny posuw poprzeczny na 1 cykl stołu: 0,3 15 mm/skok,
- szybkość przesunięcia suportu przy obciąganiu ściernicy: 0,03 0,3 m/min,
- wartość działki elementarnej posuwu pionowego precyzyjnego: 0,001 mm,
- fabryczna prędkość obrotowa tarczy szlifierskiej: 2680 obr/min,
- moc napędu wrzeciona narzędziowego: 2,2 kW,
- średnica zewnętrzna tarczy szlifierskiej: 170 250 mm,
- maksymalna wysokość tarczy szlifierskiej: 32 mm,
- średnica wewnętrzna tarczy szlifierskiej: 76 mm.

Szlifierka miała zmodyfikowane wrzeciono, co pozwoliło na dowolny dobór prędkości obrotowej ściernicy za pomocą przemiennika częstotliwości SJ100 firmy *Hitachi, Ltd.* (model 030HFE). Dokładność nastawy częstotliwości dla zastosowanego przemiennika częstotliwości wynosiła 0,1 Hz, co oznacza, że przy założeniu stałej prędkości obwodowej ściernicy, rozdzielczość nastawcza odpowiadała zmianie średnicy ściernicy około 1 mm. Dlatego w badaniach zmian częstotliwości dokonywano, gdy ściernica uległa zużyciu promieniowemu nie mniejszemu niż 0,8 mm w stosunku do poprzedniej wartości.

W celu zapewnienia niezmiennej prędkości obwodowej ściernicy (v_s), wykonano charakterystykę przełożenia częstotliwości na prędkość obwodową ściernicy, w zależności od jej średnicy z wykorzystaniem tachometru *Hand-Tachometer* typu H 6 wyprodukowany przez firmę *VEB Meßgerätewerk Beierfeld* (Niemcy). Szczegółową analizę charakterystyki omawianego przełożenia, wraz z tabelą opracowanych zależności zamieszczono w załączniku (rozdz. Z.3.3.1).

Ponadto w celu zapewnienia stałego wydatku chłodziwa wyrażonego w litrach na minutę, zmodyfikowano układ chłodzenia obrabiarki, wprowadzając zawór, pokrętło, igłę wskazującą oraz tarczę z naniesioną skalą. Skalę na tarczy opracowano doświadczalnie. Podobnie postępowano w przypadku określania posuwu wzdłużnego stołu szlifierki. Pełen opis cechowania wydatku cieczy chłodząco-smarujące oraz prędkości posuwu zamieszczono w załączniku do pracy (rozdz. Z.3.3.2).



Rys. 4.3.1. Stanowisko badawcze zbudowane na szlifierce do płaszczyzn typu OC3:

- 1 zasilacz, 2 konwerter 5125A, 3 komputer z kartą A/C, 4 wzmacniacz 5019A, 5 siłomierz 9251A,
 - 6 czujnik EA 8152A2, 7 czujnik drgań, 8 regulator wydatku cieczy chłodząco-smarującej,
- 9 przemiennik częstotliwości SJ100, 10 panel sterowania automatycznym posuwem, 11 – posuw promieniowy, 12 – posuw osiowy, 13 – szybki przesuw wzdłużny, 14 – posuw wzdłużny stołu

Po czynnościach przygotowawczych, złożono stanowisko do pomiaru i rejestracji składowych siły szlifowania oraz sygnału emisji akustycznej. W skład tego stanowiska,

oprócz wcześniej wymienionych elementów, weszły następujące urządzenia (rys. 4.3.1, D67):

- kwarcowy siłomierz typu 9251A firmy *Kistler Instrument Corp.*,
- piezoelektryczny czujnik EA typu 8152A2 firmy Kistler Instrument Corp.,
- konwerter typu 5125A firmy Kistler Instrument Corp.,
- wielokanałowy wzmacniacz ładunku typu 5019A firmy Kistler Instrument Corp.
- karta A/C typu DAS-1601 firmy Keithley Instruments, Inc.,
- komputer IBM PC klasy Pentium,
- ręczny licznik przejść ściernicy oraz elementy połączeniowe.

Ponadto, układ pomiarowy został wyposażony w specjalnie zaprojektowanym i wykonany uchwyt obróbkowy, który pozwolił na jednoczesną integrację czujnika sił, czujnika emisji akustycznej i próbki w strefie szlifowania. Uchwyt ten składał się z następujących elementów (rys. 4.3.2, D68):

- podstawa siłomierza,
- podstawa próbki,
- element stabilizujący próbkę,
- element dociskowo-mocujący dla czujnika EA.

b)



Rys. 4.3.2. Przygotowany do badań uchwyt obróbkowy: a) bez czujników i próbki, b) z zamocowanymi czujnikami i próbką; 1 – element stabilizujący, 2 – podstawa uchwytu, 3 – element dociskowy, 4 – podstawa próbki, 5 – czujnik EA typu 8152A2, 6 – siłomierz typu 9251A

Siłomierz kwarcowy typu 9251A, produkcji *Kistler Instrument Corp.*, może mierzyć jednocześnie 3 składowe w układzie ortogonalnym. Do zestawu z siłomierzem producent dołączył:

- układ wstępnego obciążenia typu 9461:
 - śruba wstępnego obciążenia (oznaczenie prod.: 3.322.269),
 - tuleja centrująca (oznaczenie prod.: 3.750.037),
 - nakrętka wieńcowa (oznaczenie prod.: 3.322.272),
- przewody połączeniowe typu 1939A.

Zakres pomiarowy siłomierza wynosił -2,5 - 2,5 kN dla składowych stycznej i porzecznej, natomiast dla składowej normalnej siły szlifowania zakres ten był szerszy i zwierał się w przedziale -5,0 - 5,0 kN. Ponadto, siłomierz ten posiadał następujące cechy: wartość progowa: < 0,01 N, błąd liniowości pomiarów: $\leq \pm 1$ %, histereza: $\leq 0,5$ %.



Rys. 4.3.3. Siłomierz kwarcowy typu 9251A produkcji *Kistler Instrument Corp.*:
a) w trakcie montażu, b) zamocowany i podłączony;
1 – śruba wstępnego obciążenia wraz z tuleją centrującą,
2 – nakrętka wieńcowa, 3 – przewody połączeniowe typu 1939A

Ze względu na składowe F_x i F_y (F_c), które przenoszone są przez tarcie statyczne między bazą i nakrętką wieńcową dociśniętymi do powierzchni sensora, czujnik ten musi być

wstępnie obciążony. Zgodnie z zaleceniami producenta, w celu zapewnienia pomiarów w pełnym zakresie dla siłomierza 9251A, zastosowano wstępne obciążenie równe $F_v = 25$ kN, stosując centralną śrubę oraz nakrętkę wieńcową dostarczoną wraz z czujnikiem.

Dokładność pomiaru składowych siły szlifowania, dla użytego siłomierza, według producenta dla każdej z osi jest mniejsza lub równa $\delta F = \pm 3\%$.

Natomiast zastosowany do pomiarów EA piezoelektryczny czujnik emisji akustycznej typu 8152A2 firmy *Kistler Instrument Corp.*, charakteryzował się wbudowanym konwerterem falowym do mierzenia EA o częstotliwości powyżej 50kHz w układach obróbczych (strukturach maszynowych), gdzie źródłem sygnałów są tarcie, deformacje plastyczne, formowanie i rozrost pęknięć oraz mikropęknięć. Czujnik posiadał następujące parametry techniczne:

- zakres częstotliwości (dla \pm 10 dB): 100 900 KHz,
- czułość: 48 $d_{\text{Bref 1 V/(m/s)}}$,
- napięcie i natężenie wyjściowe: ± 2 V, 2 mA,
- impedancja: 10Ω .



Rys. 4.3.4. Piezoelektryczny czujnik emisji akustycznej typu 8152A2 firmy *Kistler Instrument Corp.:* 1 – przewód typu PUR 1185A IP65, 2 – sensor piezoelektryczny typu 5125A, 3 – otwór do mocowania czujnika ø5,1 mm

Czujnik ten, ze względu na swoje cechy, jest bardzo czuły na fale powierzchniowe (fale *Rayleigha*) i na fale wgłębne (poprzeczne i podłużne) w zakresie przenoszonego pasma częstotliwości. Ponadto charakteryzuje się małą impedancją wejściową i wyjściową.



Rys. 4.3.5. Konwerter typu 5125A firmy *Kistler Instrument Corp.* a) widok ogólny, b) elementy składowe: 1 – filtr górno-przepustowy 5325A50, 2 – filtr dolno-przepustowy 5327A1000, 3 – stała czasowa 5328A0.12

Kolejny element – konwerter typu 5125A firmy *Kistler Instrument Corp.* przetwarzał (wzmacniał i filtrował) wysokoczęstotliwościowe sygnały piezoelektrycznych czujników EA. Dodatkowo wbudowany przetwornik RMS (ang. *root-mean-square*) przetwarzał sygnał, obliczając wartość skuteczną sygnału EA z zadaną stałą czasową. W tym celu wykorzystano specjalne moduły (rys. 4.3.5, D69):

- filtr górno-przepustowy 5325A50 50 kHz (1),
- filtr dolno-przepustowy 5327A1000 1000 kHz (2),
- − stała czasowa 5328A0.12 − 0,12 ms (3).

Błąd przetwarzania sygnału konwertera (δEA_{RMS}), wg danych producenta, wyniósł ± 3%. Natomiast parametry obliczania wartości skutecznej były następujące: pasmo częstotliwości (dla ± 3 dB) 10 – 1000 kHz, współczynnik szczytowy dokładności 3 %, stała czasowa 1,2 ms, napięcie wyjściowe 0 – 5 V, natężenie prądu 0 – 5 mA, impedancja wyjściowa 10 Ω, szum < 10 mVpp⁹.



Rys. 4.3.6. Wielokanałowy wzmacniacz ładunku typu 5019A firmy *Kistler Instrument Corp.:* 1 – diody sygnalizacyjne, 2 – wyświetlacz informacyjno-dialogowy, 3 – elementy sterowania

Wzmacniacz 5019A to wielokanałowy, skalibrowany, wielozakresowy wzmacniacz ładunku ze sterowaniem mikroprocesorem. Urządzenie to znajduje główne zastosowanie w obszarze pomiarów siły i momentu za pomocą dynamometrów piezoelektrycznych. Urządzenie charakteryzowało się:

- liczbą kanałów: 3 lub 4 (w badaniach wykorzystano 3),
- zakresem pomiarowym: $\pm 10 999000 \text{ pC}$,
- czułością sensora: 0,01 9990 pC/MU,
- dokładnością: $\leq \pm 1$ %,
- znamionowym napięciem wyjściowym: ± 10 V,
- błędem spowodowanym przesunięciem zera: < 0,4 mV.

Szczegółową specyfikację techniczną oraz konfigurację sprzętowo-programową karty pomiarowej DAS-1601 produkcji *Keithley Instruments, Inc.* wyposażonej w 12 bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy, zamieszczono w załączniku (rozdz. Z.3.2.1). Natomiast sposób połączenia wyjść konwertera (podającego filtrowany sygnał EA oraz chwilową wartość EA_{RMS} dla podanego sygnału z czujnika EA), a także sygnałów składowych siły szlifowania z wielokanałowego wzmacniacza ładunku typu 5019A z kanałami wejściowymi karty pomiarowej ujęto w tab. Z.3.3 załącznika.

⁹ mVpp – amplituda niepożądanych w sygnale "szpilek", mierzona pik do piku i wyrażona w miliwoltach.

Dla zminimalizowania błędów pomiarowych oraz w celu zapewnienia by zakłócenia występujące w procesie nie zdeterminowały wyników badań, starano się zapewnić zawsze te same warunki, w których przeprowadzono eksperymenty. Jednakże na dokładność dokonanych pomiarów na stanowisku badawczym, podczas przeprowadzonych badań, wpływało szereg czynników, głownie w postaci:

- dokładności pomiarowej karty A/C,
- dokładności pomiarowej czujnika EA,
- dokładności pomiarowej siłomierza.

Wykorzystując specyfikację elementów składowych toru pomiarowego, określono całkowite błędy pomiaru dla poszczególnych wielkości wyjściowych procesu, otrzymując poniższe wartości:

$$\Delta(EA) = \delta R + \delta EA = 0,0059 + |\pm 5\%| = 0,0059 + 10\% \text{ [V]}, \tag{4.3.1}$$

$$\Delta(EA_{RMS}) = \delta R + \delta EA_{RMS} = 0,0059 + |\pm 3\%| = 0,0059 + 6\% \text{ [V]}, \tag{4.3.2}$$

$$\Delta(F_n) = \delta R + \delta F + \delta F_n = 0,0059 + |\pm 3\%| + 0,32108154 = \dots$$

$$\dots = 0,32698154 + 6\% \text{ [N]},$$

$$\Delta(F_c) = \delta R + \delta F + \delta F_c = 0,0059 + |\pm 3\%| + 0,15147542 = \dots$$

$$\dots = 0,15737542 + 6\% \text{ [N]}.$$
(4.3.4)

Szczegółową analizę błędów, w tym wyprowadzone powyżej równania, zamieszczono w załączniku do niniejszej pracy w rozdziale Z.1.10.

Zastosowany układ pomiarowy siły szlifowania i sygnału emisji akustycznej zapewnił dużą rozdzielczość przetwarzania sygnału z analogowego na cyfrowy, czego odzwierciedleniem są niskie wartości błędów pomiarowych.



Rys. 4.3.7. Zestaw MDSx do diagnozowania szlifierki produkcji IOS Kraków: a) czujnik drgań, b) przyrząd pomiarowo-sterujący; 1 – czujnik drgań, 2 – przyssawka magnetyczna, 3 – amperomierz, 4 – przełącznik wejścia układu pomiarowego, 5 – wybór zakresu pomiarowego

Aby poprawić chropowatość i wyeliminować falistości powierzchni szlifowanej, a także poprawić bezpieczeństwo pracy, wykorzystano zestaw do kontroli stabilności pracy układu.

Diagnozę szlifierki dokonano za pomocą czujnika drgań z przyssawką magnetyczną, dla różnych prędkości obwodowych ściernicy pracującej bez obciążenia. Zestaw produkcji *Instytutu Obróbki Skrawaniem* w Krakowie do diagnozowania szlifierki składał się z:

- przyrządu pomiarowo-sterującego IOS MDSx ze wskaźnikiem MK-2A,
- oraz czujnika drgań z przyssawką magnetyczną.

W badaniach nie wykryto znaczących zakłóceń, uzyskując amplitudę drgań wrzeciona ściernicy wahającą się w zakresie dokładności wskazań przyrządu $\pm 2 \mu A$, co uznano subiektywnie za wynik zadawalający i zrezygnowano z koniczności przemieszczania mas wyważających w oprawie ściernicy.

Z powodu pracochłonności oraz długich czasów pomiędzy poszczególnymi punktami pomiarowymi, w celu uniknięcia błędów w badaniach wykorzystano ręczny licznik przejść ściernicy. Wspomagał on prowadzenie badań, zliczając kolejne zdarzenia, którymi były kolejne szlify wykonane przez ściernicę. Licznik zliczał naciśnięcia dźwigni (każde naciśnięcie dźwigni zwiększało stan licznika o jeden), które wykonywano po przejściu ściernicy przez całą powierzchnię próbki. Pojemność licznika wynosiła 9999 (4. cyfrowy wskaźnik mechaniczny). Licznik kasowano na początku każdej serii pomiarowej.



Rys. 4.3.8. Licznik przejść ściernicy wykorzystany w badaniach: 1 – dźwignia zliczająca, 2 – wskaźnik zliczeń, 3 – zerowanie

Realizacja postawionego zadania, wymagała także zaprojektowania oraz napisania oprogramowania do akwizycji wybranych sygnałów, które można zmierzyć w trakcie obróbki, co wynikało z przyjętego zakresu badań. Aplikację wykonano w środowisku programowym *TestPoint 3.3* firmy *Capital Equipment Corporation*. W celu zapewnienia uniwersalności programu, jego funkcje zostały tak zrealizowane, aby użytkownik miał zawsze wybór co do długości rejestrowanych sygnałów jak i źródła, z którego w danym momencie chce pobrać dane. Dodatkowo aplikację napisano w języku angielskim, zapewniając tym samym czytelność funkcji programu dla jak największej grupy potencjalnych użytkowników.

Stworzona aplikacja, o nazwie *A/D Signal Acquisition 3.0*, (nr wersji wynika z kolejnych udoskonaleń programu) pozwala na wybranie trybu pracy (rzeczywisty pomiar lub symulacja), dobór numerów kanałów karty pomiarowej, z których rejestrowane będą sygnały oraz ustalenie częstotliwości próbkowania przypadającej na jeden kanał i całkowitego czasu próbkowania. Program wyświetla ostatnio zarejestrowane sygnały w postaci wykresu oraz pozwala na zapisanie aktualnie wyświetlanych przebiegów do pliku o dowolnej nawie, a także odczyt tych plików. Wszystkie rejestrowane sygnały mogą być automatycznie zapisywane (w zależności od ustawionych parametrów w opcjach).


Rys. 4.3.9. Okno główne programu *A/D Signal Acquisition 3.0* do akwizycji wybranych sygnałów ze strefy szlifowania

Zarejestrowane sygnały, prezentowane w postaci graficznej na wykresie, można poddać analizie i edycji wykorzystując do tego okno szczegółowego podglądu. Opcje zawarte w programie pozwalają ponadto, na kopiowanie danych, zmianę wartości kolejnych wartości dla obu osi, a także na zmianę skali w jakiej są wyświetlane wyniki oraz ich wydruk.

Szczegółowe działanie programu oraz opis wszystkich funkcji, zamieszczono w załączniku w rozdziale Z.3.5.1.

4.4. Parametry i warunki badań

Proces szlifowania płaszczyzn odbywał się w kierunku przeciwbieżnym przy różnych nastawach parametrów obróbki, których zakres wartości przedstawiono poniżej. Dodatkowo opisano wykorzystane w badaniach ściernice, przedmioty obrabiane, a także rodzaj i wydatek cieczy chłodząco-smarującej.

W odniesieniu do rozmaitych obliczeń fizykochemicznych, które należało przeprowadzić, przyjęto, że badania przeprowadzono w niezmiennych warunkach standardowych o ściśle określonej temperatura i ciśnienie otoczenia [JD1996]:

- ciśnienie: p = 101,325 kPa = 101325 N/m²,

- temperatura: T = 298,15 K = 25 °C.

4.4.1. Sciernice zastosowane w badaniach

Do badań wykorzystano ściernice elektrokorundowe. W przypadku szlifowania ściernicami tego typu, w kształtowaniu materiału obrabianego dominują zjawiska cieplne, kosztem zjawisk mechanicznych, co powoduje wystąpienie niekorzystnego bilansu cieplnego. Pomimo rozwoju innych materiałów ściernych, z powodów ekonomicznych, ściernice wykonane z ziaren elektrokorundu stale pozostają podstawowym narzędziem ściernym [KW1997].

Zastosowane w badaniach ściernice różniły się twardością. Zgodnie z zaleceniami producenta, wybrano skrajne twardości ściernic stosowane do szlifowania wykańczającego obwodem ściernicy, jak i do ostrzenia narzędzi ze stali. Wykorzystano ściernice miękką oraz

o średniej twardości (wg [N01/525]) wykonane w *Fabryce Narzędzi Ściernych* w Grodzisku Mazowieckim oznaczone symbolami wg [N01/603-4]:

- PN-ISO 603-4:2001 1 250x32x98 99A 60 J 7 V 42m/s,
- PN-ISO 603-4:2001 1 250x32x98 99A 60 M 7 V 42m/s.



Rys. 4.4.1. Ściernice zastosowane w badaniach: a) ściernica o twardości J, (ceglasto-czerwona, spoiwo VT5), b) ściernica o twardości M (biała, spoiwo VO8)

Są to ściernice konwencjonalne, płaskie, typu T1 (rodzaj A – prostokątny), zbudowane w oparciu o materiał ścierny o wysokiej zdolności skrawnej, jakim jest elektrokorund szlachetny (99A, otrzymany z tlenku glinu α Al₂O₃), połączony spoiwem ceramicznym (V, mieszanina szkła i surowców mineralnych). Ściernice charakteryzowały się ziarnem o średniej wielkości (nr 60: 25 – 300 µm), średnią strukturą (struktura 7: udział objętościowy ścierniwa V_z = 48 %) oraz dopuszczalną prędkością obwodową 42 m/s.

Dla uproszczenia oraz ze względu na podobną charakterystykę zastosowanych ściernic, w dalszej części pracy, autor posługuje się ich uproszczonym oznaczeniem (odniesionym do twardości narzędzia): ściernica J, ściernica M.

4.4.2. Parametry profilowania i ostrzenia ściernic

Ściernice obciągano obciągaczem jedno-ziarnistym typu M1010 o wielkości diamentu 1,23 karata i kącie wierzchołka 93 – 110°, w stałych warunkach przy następujących parametrach:

- prędkość obwodowa ściernicy: $v_{s(d)} = 18 \text{ m/s}$ (f = 25,4 Hz dla $d_s = 250 \text{ mm}$),
- prędkość posuwu obciągacza: $v_{fd} = 230 \text{ mm/min}$,
- dosuw obciągacza dla ściernicy J: $a_d = 0,05$ mm (minimum 2 przejścia),
- dosuw obciągacza dla ściernicy M: $a_d = 0,03$ mm (minimum 3 przejścia),
- bez wydatku chłodziwa: $Q_c = 0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min.}$

4.4.3. Prędkości obwodowe ściernic

Zgodnie z zaleceniami podanymi w pracy [OP1986], badania rozpoznawcze przeprowadzono z prędkościami obwodowymi ściernicy odpowiednimi dla szlifowania płaszczyzn: $v_s = \{25, 27, 5, 30, 32, 5, 35\}$ m/s. Do badań właściwych wybrano prędkość obwodową ściernicy, która charakteryzowała się najlepszą korelacją z wartościami wyjściowymi procesu, zarejestrowanymi w trakcie badań rozpoznawczych: $v_s = 27,5$ m/s.

W przypadku innych operacji i zabiegów zastosowano mniejsze wartości vs:

- W trakcie wyrównania powierzchni zamocowanych próbek (tzw. zabielenia próbek) stosowano prędkość obwodową ściernicy równą 18 m/s.
- Zabieg uzdatniania czynnej powierzchni ściernicy (profilowanie połączone z ostrzeniem) wykonano dla $v_{s(d)} = 18$ m/s.
- Pomiar zużycia ściernicy metodą wcinania żyletki odbywał się przy prędkości v_s = 18 m/s, zarówno przy tworzeniu bazy pomiarowej w postaci nacięcia, jak i odwzorowywania zarysu krawędziowego czynnej powierzchni ściernicy.

Ponieważ ściernice ulegały stopniowemu zużyciu promieniowemu, w celu zapewnienia stałej prędkości obwodowej v_s stosowano różne prędkości obrotowe n_s ściernicy zgodnie z zależnością [OP1986]:

$$v_{s[m/s]} = \frac{\pi \cdot d_{s[mm]} \cdot n_{s[obr/min]}}{1000 \cdot 60} \quad [m/s].$$
(4.4.1)

Zmiany promienia kompensowano poprzez regulację parametrów prądu elektrycznego przy użyciu przemiennika częstotliwości SJ100 firmy *Hitachi, Ltd.* (model 030HFE). Zmieniając obroty wrzeciennika narzędziowego ściernicy, zachowano zależność pomiędzy prędkością obwodową, szybkością obrotową i aktualną średnicą ściernicy. Zależność tą szczegółowo opracowano w załączniku do niniejszej pracy (rozdz. Z.3.3.1).

4.4.4. Prędkości przedmiotu obrabianego i stołu szlifierki

W badaniach rozpoznawczych zastosowano pełen przekrój wartości prędkości posuwu wzdłużnego: $v_{ft} = \{4; 9; 14; 19; 24\}$ m/min. Natomiast do badań właściwych wybrano prędkość posuwu wzdłużnego $v_{ft} = \{4; 14; 24\}$ m/min, która charakteryzowały się najlepszą korelacją z wartościami wyjściowymi procesu zarejestrowanymi w trakcie badań rozpoznawczych.

W przypadku szlifierki OC3, którą zastosowano w badaniach, mechanizm posuwu wzdłużnego oraz poprzecznego (osiowego) reguluje się bezstopniowo za pomocą zaworu hydraulicznego. W celu ustawienia danej prędkości posuwu v_{ft} , należało wycechować naniesioną w pobliżu potencjometrów posuwu skalę. Opis sposobu wycechowania skali dla opisanej prędkości zawarto w załączniku w rozdziale Z.3.3.3.

Wartość posuwu osiowego stołu w trakcie procesu szlifowania była stała i wynosiła $f_a = 0,3$ mm na 1 cykl stołu. Zabieg uzdatniania czynnej powierzchni ściernicy (profilowanie połączone z ostrzeniem) wykonano bez włączonego posuwu wzdłużnego. Posuw osiowy w trakcie zabiegu obciągania wynosił $v_{fd} = 230$ mm/min.

Natomiast pomiar zużycia ściernicy metodą wcinania żyletki odbywał się przy wyłączonym posuwie osiowym i wzdłużnym ($v_{ft} = 0 \text{ m/min}$, $v_{fa} = 0 \text{ mm/min}$), zarówno przy tworzeniu bazy pomiarowej w postaci nacięcia, jak i odwzorowywania zarysu krawędziowego czynnej powierzchni ściernicy.

4.4.5. Wartości styku roboczego

W badaniach rozpoznawczych zastosowano pełen przekrój wartości styku roboczego (głębokości szlifowania): $a_e = \{0,01; 0,02; 0,03; 0,04\}$ mm. Natomiast do badań właściwych wybrano głębokość szlifowania równą $a_e = 0,03$ mm, która charakteryzowała się najlepszą

korelacją z wartościami wyjściowymi procesu, zarejestrowanymi w trakcie badań rozpoznawczych. W przypadku innych operacji i zabiegów zastosowano odpowiednie wartości styku roboczego:

- zabieg tzw. obciągania ściernicy wykonano dla różnych wartości dosuwu, uzależniając je od stopnia twardości ściernicy:
 - dosuw obciągacza dla ściernicy J: $a_d = 0,05$ mm (minimum 2 przejścia),
 - dosuw obciągacza dla ściernicy M: $a_d = 0.03$ mm (minimum 3 przejścia).
- W trakcie odwzorowywania zarysu krawędziowego CPS (pomiary zużycia krawędziowego ściernicy metodą wcinania żyletki), zastosowano styk roboczy równy $a_e = 0,20$ mm w rozbiciu na mniejsze wartości: 20×0,01 mm. Całkowitą wartość styku podzielono w celu zapewnienia stopniowego, łagodnego nacinania taśmy żyletkowej, która była wykonana ze względnie twardej, ale kruchej stali, a tym samym zminimalizowanie ryzyka ich pęknięcia.

W przypadku szlifierki OC3 wartość działki elementarnej pokrętła zgrubnego posuwu wynosi 0,002 mm, a precyzyjnego (mikrometrycznego) 0,001 mm. Takie parametry obrabiarki pozwoliły na precyzyjne ustawianie wartości styku roboczego w trakcie przebiegu procesu szlifowania, jak i w pozostałych operacjach i zabiegach, bez wykonywania dodatkowych prac przygotowawczych.

4.4.6. Przedmiot obrabiany

Zgodnie z zaleceniem producenta ściernic, w odniesieniu do zastosowanych twardości narzędzia, szlifowano materiały twarde, którymi były próbki ze stali hartowanej:

- NC10 (60 ± 2) HRC (19×8×20 mm) próbki wykorzystywane do mierzenia i rejestracji wyjściowych wielkości procesu,
- NC10 (60 ± 2) HRC (100×20×8 mm) próbki zastosowane do przyspieszonego zużywania czynnej powierzchni ściernicy oraz do pomiarów zmian zachodzących w warstwie wierzchniej próbek,
- gdzie: NC oznaczenie stali narzędziowej stopowej do pracy na zimno z chromem (Cr), jako zasadniczym pierwiastkiem stopowym, wg [N86/85023]; HRC twardość metalu wyznaczona statystyczną metodą Rockwella, skrót zastępujący jednostkę twardości (kgf/mm²) i jednocześnie informujący o metodzie jej wyznaczenia, wg [N91/04355], (ang. *Hardness of Rockwell with C scale*).



Rys. 4.4.2. Próbki wykorzystane w badaniach: a) próbka 19×8×20 mm, b) próbka 100×20×8 mm

Stal NC10 należy do stali narzędziowych stopowych do pracy na zimno. Wykonuje się z niej narzędzia służące do obróbki materiałów w temperaturze otoczenia (narzędzia z tego typu stali nie osiągają w czasie pracy temperatury powyżej 200 °C). Ponadto, od stali narzę-

dziowych stopowych do pracy na zimno wymaga się przede wszystkim dużej twardości i odporności na ścieranie, którą uzyskuje się przez dodatki stopowe, zwłaszcza V, Cr i W, które wpływają na tworzenie się w strukturze materiału węglików stopowych (sprzyjających uzyskiwaniu dużej odporności stali na ścieranie) [DOB03, DOB04].

Szczegółowy opis zastosowanego materiału, z którego wykonano próbki do badań, w tym jego skład chemiczny i własności, zamieszczono w załączniku do niniejszej pracy (rozdz. Z.3.6.1).

4.4.7. Rodzaj i wydatek cieczy chłodząco-smarującej

Proces szlifowania odbywał się przy udziale płynu chodząco-smarującego o stałym wydatku cieczy, równym $Q_c = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$. Pozostałe operacje i zabiegi wykonano bez udziału chłodziwa ($Q_c = 0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$).

Zastosowano syntetyczny płyn chodząco-smarujący do szlifowania przy małym obciążeniu typu *Cimtech* D18 produkcji firmy *Cimcool Industrial Products B.V.* Jest to wodnorozcieńczalny płyn chłodząco-smarujący o gęstości $\rho = 1090 \text{ kg/m}^3$ stosowany do szlifowania i skrawania. Zgodnie z zaleceniami producenta, płyn rozcieńczono z wodą stosując zalecane stężenie początkowe dla szlifowania 3,0 %.

Chłodzenie stosowano tylko w trakcie przebiegu procesu szlifowania, w tym w trakcie pomiarów sygnałów pochodzących ze strefy obróbki. W pozostałych operacjach (ostrzenie ściernicy i odwzorowanie zarysu krawędziowego CPS) nie stosowano chłodziwa.

Sposób zapewnienia stałego wydatku chłodziwa zawarto w załączniku do niniejszej pracy (rozdz. Z.3.3.2).

4.5. Stanowiska pomiarowe

W trakcie badań eksperymentalnych skorzystano stanowisk pomiarowych przeznaczonych do pomiarów zużycia krawędziowego ściernic, pomiarów zmian zużycia promieniowego ściernic, pomiarów zmian mikrogeometrii powierzchni ściernic i próbek oraz stanowiska przeznaczonego do wyznaczenia naprężeń w warstwie wierzchniej. Wszystkie stanowiska, oprócz jednego (przeznaczonego do pomiarów zmian zużycia promieniowego ściernicy), wymagały opracowania i skonstruowania lub przynajmniej dostosowania do wymagań postawionych przez zakres badań. Poniżej zamieszczono ich krótką charakterystykę.

4.5.1. Pomiary zużycia krawędziowego ściernic

Pomiar zużycia ściernicy przeprowadzono metodą pośrednią przez odwzorowywanie profilu osiowego ściernicy na krawędzi żyletki, umieszczonej wzdłuż osi ściernicy w specjalnie skonstruowanym uchwycie, mocowanym do stołu magnetycznego szlifierki.

W czasie pomiaru, wirującą ściernicę opuszczano w kierunku krawędzi żyletki i zagłębiano w nią z parametrami:

- styk roboczy $a_e = 0,20$ mm,
- prędkość obwodowa ściernicy $v_s = 18$ m/s (f = 25,4 Hz dla $d_s = 250$ mm),
- bez udziału chłodziwa $Q_c = 0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$,
- oraz z wyłączonym posuwem osiowym $f_a = 0$ mm/skok.

W celu stworzenia bazy porównawczej, służącej jako odniesienie podczas pomiaru zmian zaokrąglenia ściernicy, w tylnej części obwodu ściernicy nacinano obciągaczem jednoziarnistym typu M1010 o wielkości diamentu 1,23 karata i kącie wierzchołka 93 – 110°, kanałek bazowy o głębokości 0,05 mm i długości około 1 mm.



Rys. 4.5.1. Parametry oceny zużycia ściernicy i sposób odwzorowania zarysu CPS

Pomiary przeprowadzono na stanowisku złożonym z komputerowego systemu do pomiaru odległości firmy *Schunk Werth Messtechnik GmbH*, w którego skład wchodziły:

- projektor typu OPTIMUS G do pomiaru profili, w tym: oświetlacz, ekran o przekątnej 300 mm, obiektywy o powiększeniu 5×, 10×, 20×, 50× i 100×,
- jednostka centralna firmy *Sharp* z procesorem pomiarowym *Measuring Processor* MZ-3541 (w tym stacja dysków i jednostka pamięci 166 KB RAM, monitor CRT, klawiatura MZ-3541),
- drukarka oraz oprogramowanie: system operacyjny EOS 3.0 (kompatybilny z CP/M), program pomiarowy P184.



Rys. 4.5.2. Stanowisko do pomiaru zużycia krawędziowego: a) odwzorowanie profilu CPS, b) pomiar profilu;

1 – ściernica, 2 – żyletka, 3 – szczęki dociskowe, 4 – śruby dociskowe, 5 – szczęki poziomujące,
6 – śruba dociskowa szczęk poziomujących, 7 – projektor pomiarowy typu OPTIMUS G, 8 – stolik pomiarowy,
9 – klawiatura MZ-3541, 10 – zespół sterowania stolikiem pomiarowym, 11 – monitor CRT, 12 – drukarka,
13 – stacja dysków, 14 – komputer *Sharp* z procesorem pomiarowym MZ-3541

Z odwzorowanych na żyletkach profili ściernic, z wykorzystaniem systemu komputerowego do pomiaru odległości *Measuring Processor* MZ-3541, stosując powiększenie 50× na urządzeniu firmy *Schunk Werth Messtechnik GmbH*, wyposażonym w projektor typu OPTIMUS G, wyznaczono parametry zużycia krawędziowego ściernicy długość czynnej krawędzi ściernicy (B_{kr}), zużycie krawędziowe ściernicy (Δr_{kr}), kąt zużycia krawędziowego ściernicy (α_{kr}) oraz szerokość czynną ściernicy w przekroju osiowym (b_D).

Tab. 4.5.1. Dane obiektywu Optimus G [SWM1985]

powiększenie	zakres widziany	zakres pomiarowy	maksymalny pomiar	odchyłka maksymalna	
	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[µm]
50×	6	11	22,5	0,2	1,2

Wartości parametrów zużycia krawędziowego ściernicy wyznaczono z dokładnością $\pm 0,001$ mm, zarówno w kierunku pionowym, jak i w poziomym. Wynikało to rozdzielczości w jakiej pracował system do pomiaru odległości. Maksymalna wartość zniekształcenia wprowadzana przez optykę układu wynosiła (wg danych producenta) 8,2 %. Natomiast maksymalny błąd pomiaru odległości (tab. 4.5.1, D79), stanowiący odchylenie obrazu na ekranie do obrazu teoretycznego, wynosił 0,2 %. Oznacza to, że dla zastosowanego powiększenia (50×), pomiary cechowały się błędem ± 1,2 µm [SWM1985].

4.5.2. Pomiary zmian zużycia promieniowego ściernic

Zużycie promieniowe (Δr_s) określono mierząc dla każdego punktu pomiarowego średnicę ściernicy (d_s) i korzystając z zależności:

$$\Delta r_{s(i)} = \frac{d_{s(i-1)} - d_{s(i)}}{2} \text{ [mm]}, \tag{4.5.1}$$

$$\Delta r_s = \sum_{i=1}^n \Delta r_{s(i)} = \sum_{i=1}^n \frac{d_{s(i-1)} - d_{s(i)}}{2} \quad [mm], \tag{4.5.2}$$

gdzie: *i* – numer kolejnego punktu pomiarowego, *n* – ilość punktów pomiarowych, $\Delta r_{s(i)}$ – zużycie promieniowe (dla danego punktu pomiarowego), Δr_s – całkowite zużycie promieniowe.



Rys. 4.5.3. Stanowisko pomiarowe zużycia promieniowego ściernic:
a) widok ogólny, b) zbliżenie na głowicę i wskazanie pomiarowe;
1 – drukarka EDP-4000, 2 – kolumna wysokościomierza, 3 – wskaźnik cyfrowy,
4 – suwak pomiarowy, 5 – głowica pomiarowa, 6 – ściernica,
7 – pokrętło zmiany położenia suwaka pomiarowego, 8 – system pomiarowy SYLVAC

Pomiary zmian średnicy ściernic dokonywano z wykorzystaniem automatycznego wysokościomierza *TRIMOS VERTICAL* typu TVD 800A z kulkową końcówką pomiarową Ø 8 mm (TV-1.1). Badania wykonano przy zakresie pomiarowym 525 mm z dokładnością odczytu 1 μm. Błąd maksymalny wysokościomierza dla pomiarów w całym zakresie pomia-

rowym wynosił 5 µm. Wysokościomierz wyposażony był w drukarkę typu EDP-4000 firmy *SYLVAC*, która pozwalała na zarejestrowanie na taśmie papierowej wyniki kolejnych pomiarów. Ponadto, urządzenie wyposażone było w *System Pomiarowy SYLVAC'a*, który pozwalał na elektroniczny odczyt bieżących wartości.

Ponieważ wartości średnicy (i promienia) ściernicy były względnie duże ($d_s > 200$ mm, $r_s > 100$ mm), to błąd pomiarowy stanowił około 0,002% (0,004% w przypadku promienia) ich wartości. Należy tu jednak zauważyć, że oprócz dokładności urządzenia pomiarowego, wpływ na wyniki miało także położenie ściernicy względem osi wysokościomierza. Średnicę ściernicy starano się zawsze umieścić w jednej linii z osią pomiarową urządzenia.

Z powodu zaistnienia możliwości wykonania pomiaru dla punktu ściernicy odchylonego od średnicy, przyjęto że wyniki charakteryzowały się mniejszą dokładnością, niż wynika to ze specyfikacji wysokościomierza i wynosiły 0,05%. Taką wartość przedstawiają słupki błędów zamieszczone na wykresach przedstawiających zmiany wartości tych parametrów zachodzące w funkcji czasu szlifowania.

4.5.3. Pomiary zmian mikrogeometrii powierzchni ściernic i próbek

W celu wykonania wieloparametrowej analizy mikrostruktury powierzchni próbek, a także czynnej powierzchni ściernicy wykorzystano metodę stykową budując stanowisko pomiarowe, w skład którego wchodziły:



Rys. 4.5.4. Stanowisko do pomiarów mikrogeometrii: 1 – mikrokomputer z kartą A/C, 2 – regulowany stolik na próbkę, 3 – próbka, 4 – igła pomiarowa TASTER 8 (2378), 5 – profilometr ME10, 6 – wzmacniacz, 7 – sterowniki parametrów profilowania

- profilometr typu ME 10 produkcji *Carl Zeiss Jena* (Niemcy), w tym moduł wzmacniacza, moduł obliczeniowy i zasilacz produkcji *COBRABiD* typu KB 60-01,
- igła pomiarową typu TASTER 8 (2378) do zdjęcia profili próbek,
- igła pomiarową typu TASTER 10S (413) do zdjęcia profilu CPS,
- komputer IBM PC klasy AT (386),
- 12 bitowa karta pomiarowa z przetwornikiem A/C,
- podstawa pod ściernice o średnicy zewnętrznej w zakresie 170 250 mm.

Ponieważ standardowy stół profilometru nie dawał możliwości zamocowania dużych obiektów (ze względu na pionowy zakres przemieszczania głowicy), w tym wykorzystanych w badaniach ściernic, zaprojektowano i wykonano specjalną podstawę, która utrzymywała jednocześnie ściernicę, jak i głowicę pomiarową profilometru. Dodatkowo podstawę wyposażono w stolik o regulowanej wysokości, aby kompensować zużycie promieniowe ściernicy oraz zapewnić odpowiednie wypoziomowanie czynnej powierzchni ściernicy (zapewnienie względnej równoległości CPS i ścieżki po jakiej poruszała się igła pomiarowa).



Rys. 4.5.5. Podstawa pod ściernicę i głowicę pomiarową profilometru: a) podstawa pod głowicę wraz z regulowanym stolikiem poziomującym, b) układ po montażu wraz ze ściernicą;
1 – kołki podporowo-pozycjonujące, 2 – podstawa pod głowicę, 3 – stolik do regulacji poziomu, 4 – kołek podporowy, 5 – igła pomiarowa TASTER 10S (413), 6 – profilometr ME10, 7 – wzmacniacz, 8 – sterowniki parametrów profilowania

Do obsługi stanowiska badawczego wykorzystano dwa programy komputerowe:

- Karata A/C (autor: Krzysztof Szczepaniak) aplikacja służąca do rejestracji i zapisu profili chropowatości na dysk komputera,
- Parametr Win (wersja 3.0, autor: Robert Błaszczyk) aplikacja do przetwarzania danych oraz wyznaczania parametrów chropowatości. Możliwe do wyznaczenia parametry powierzchni przy pomocy tego programu oraz poprawność algorytmów ich wyznaczania zostały zweryfikowane w pracy [Koc1989] oraz w skróconej wersji podane są w załączniku do niniejszej pracy (rozdz. Z.1.1).

4.5.4. Wyznaczenie naprężeń w warstwie wierzchniej

Wyznaczenie naprężeń w warstwie wierzchniej szlifowanych elementów wykonano za pomocą metody pomiaru odkształceń podczas ich elektrolitycznego trawienia (metoda *Waissmana-Phillipsa*).

W tym celu wykonano specjalny układ (elektrolizer) przeznaczony do trawienia warstwy wierzchniej, do którego podłączono analogowy czujnik indukcyjny z głowicą pomiarową VIS MDKa-C-3 sprzężony ze wskaźnikiem cyfrowym VIS CIMETR 1 o tolerancji wskazań \pm 1 µm (rys. 4.5.6, \square 82)

W skład zestawu laboratoryjnego do wyznaczania naprężeń metodą trawienia wchodziły następujące elementy:

- elektrolizer (zbiornik do elektronicznego usuwania warstwy wierzchniej), układ mocowania (uchwyt),
- analogowy czujnik indukcyjny z głowicą pomiarową VIS MDKa-C-3,



Rys. 4.5.6. Stanowisko do trawienia warstwy wierzchniej próbek, ze względu na bezpieczeństwo pracy podzielono na 2 pomieszczenia: a) trawienie próbek, b) aparatura pomiarowo-rejestrująca

1 – uchwyt głowicy, 2 – głowica czujnika indukcyjnego VIS MDKa-C-3, 3 – ramię, 4 – uchwyt próbki, 5 – próbka, 6 – mieszadło, 7 – termometr i grzałka, 8 – elektrolizer, 9 – rejestrator VISOPRINT,

10 – regulator temperatury RT-84a, 11 – wskaźnik cyfrowy VIS CIMETR 1,

- 12 centralny system sterowania CSS-84a, 13 multiplekser MAC-1, 14 zasilacz 5372
- wskaźnik cyfrowym VIS CIMETR 1 czujnika indukcyjnego,
- zespół regulacji temperatury: termometr kontaktowy, grzałka elektryczna, elektroniczny regulator sterowany czujnikiem termistorowym,
- zespól regulacji stężenia (mieszadło),
- multiplekser MAC-1 (WSInż., WM),
- centralny system sterowania CSS-84a (WSInż., WM),
- rejestrator VISOPRINT drukujący wyniki pomiarów czujnikiem indukcyjnym wyprodukowany przez Zakład Konstrukcji Narzędzi Pomiarowych w Warszawie,
- zasilacz prądu stałego typu 5372 produkcji Zakładów UNITRA CEMI w Szczytnie,
- waga laboratoryjna typu WA-31 produkcji Zakładów Mechaniki Precyzyjnej w Gdańsku,
- suwmiarka cyfrowa typu MAUa-E1 wyprodukowana przez VIS Spółka z o.o. z Warszawy,
- środki chemiczne: elektrolit (10 % mieszanina wodna kwasu azotowego HNO₃ i kwasu solnego HCl w proporcjach 1:3), wosk mineralny (parafina), tri-chloroetylen C₂HCl₃.

Zastosowany układ do pomiaru strzałki ugięcia charakteryzował się zakresem pomiarowym \pm 1000 µm, wartością działki elementarnej i tolerancją wskazań 1 µm oraz naciskiem pomiarowym głowicy pomiarowej: \leq 0,3 N.

Wszystkie obliczenia naprężeń przeprowadzono przy założeniu istnienia jednakowych naprężeń w pojedynczych usuwanych strefach materiału o grubości (Δh_i). Natomiast w celu wyznaczenia naprężeń dla kolejnych stref, napisano specjalistyczny program w oparciu o algorytmy, zależności i funkcje wyznaczone w pracy [PliS1986]. Kod źródłowy tego programu wraz z przykładowymi wynikami zamieszczono w załączniku (rozdz. Z.3.5.3).

Masy próbek określono przy użyciu szalkowej wagi laboratoryjnej typu WA-31, produkcji *Zakładów Mechaniki Precyzyjnej* w Gdańsku. Konstrukcja wagi zapewniała ochrony przed wpływem czynników zewnętrznych na wyniki pomiarów. Dokładny odczyt położenia skali odbywał się optycznie, na widocznej w dole obudowy matówce. Pomiary wykonane tą wagą charakteryzowały się zakresem pomiarowym 200 g, błędem podziałki uchylnej 0,05 mg (wg instrukcji) oraz dokładnością pomiarową \pm 0,0001 g.



Rys. 4.5.7. Narzędzia wykorzystane w trakcie pomiarów geometryczno-fizycznych próbek: a) waga laboratoryjna typu WA-31, b) suwmiarki cyfrowej typu MAUa-E1; 1 - odważniki, 2 - regulator (gramy), 3 - wskaźnik równowagi, 4 – szalka z próbka, 5 – blokada szalek, 6 – regulator (miligramy)

Natomiast wymiary próbek zmierzono przy użyciu suwmiarki typu MAUa-E1 o zakresie pomiarowym 0 – 150 mm, wyprodukowanej przez firmę VIS Spółka z o.o. (Polska). Wyniki pomiarów odczytywane były z wyświetlacza cyfrowego w milimetrach z rozdzielczością 0,01 mm.

4.6. Wyniki badań rozpoznawczych i ich analiza

W wyniku przeprowadzonych badań rozpoznawczych ustalono konieczną liczbę powtórzeń, niezbędną do realizacji zadania postawionego dla części właściwej eksperymentów. Wyznaczono istotność zastosowanych wielkości wejściowych procesu obwodowego szlifowania płaszczyzn na rejestrowane wielkości wyjściowe procesu: F_c , F_n , EA_{RMS} , $R_{a(w)}$. Ponadto, analiza statystyczna wyników badań, pozwoliła na wyznaczenie uproszczonych modeli matematycznych procesu. Zrealizowane badania, pozwoliły także na określenie najkorzystniejszych wartości wielkości wejściowych procesu (v_s , v_{ft} , a_e), ze względu na mierzone rezultaty obróbki, wyznaczając tym samym zakres badań właściwych.

4.6.1. Ustalenie liczby powtórzeń

W przeprowadzonych badaniach, głównym kryterium oceniającym proces było zużycie ściernicy, wyrażone wybranymi parametrami opisującymi CPS oraz sygnały wyjściowe procesu, dlatego też przy ustalaniu ilości powtórzeń pod uwagę wzięto następujące parametry:

- zużycie krawędziowe ściernicy: Δr_{kr} ,
- powierzchnia zużycia krawędziowego ściernicy od strony natarcia: A_{kr} , _
- starcie względne wzniesień profilu (dla wierzchołków ziaren aktywnych): l_{st} ,
- średnia elementarna głębokość szlifowania: a_{zsr} ,
- wskaźnik zdolności skrawnej czynnej powierzchni ściernicy: K_{CPS},
- średnia wartość wysokości wzniesień profilu (wierzchołków ziaren): R_c ,
- średni odstęp miejscowych wzniesień profilu (wierzchołków ziaren), RS_m, _
- wartość skuteczna sygnału emisji akustycznej: EA_{RMS} .

W badaniach przeanalizowano 1 punkt pomiarowy pracy ściernicy, równy dwóm przejściom ściernicy nad próbką NC10 (60 ± 2) HRC ($100 \times 20 \times 8$ mm), co odpowiadało ubytkowi materiału około $V_w = 120$ mm³. Po każdej próbie, odnawiano czynną powierzchnię ściernicy w zabiegu obciągania. Dla każdego z wybranych parametrów wyznaczono oddzielnie minimalną liczbę powtórzeń (*n*), przeprowadzając N = 20 prób badanego procesu szlifowania i przyjmując arbitralnie precyzję estymacji d = 5 % (zasięg w stosunku do poprawnej wartości) oraz poziom istotności statystycznej $\alpha = 0,05$ (95% pewności). Zgodnie z zaleceniami zawartymi w pracy [Pol1984], przy liczbie pomiarów równorzędnych N < 25 - 30, do oceny niedokładności próbek zastosowano rozkład *t-Studenta* przyjmując wartości krytyczne t_{α} dla liczby stopni swobody N - 1 = 19 otrzymując $t_{0.05:19} = 2,093024$ oraz poniższe wyniki:

$T1-250x32x9v_{ft} = \{4, 14, 2\}$	T1-250x32x98-99A60J7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC (100×20×8 mm), $v_s = 27,5$ [m/s], $a_e = 0.03$ [mm], $v_{fi} = \{4, 14, 24\}$ [m/min], $f_a = 0.3$ [mm/skok], $Q_c = 3 \times 10^{-3}$ [m ³ min ⁻¹], $V_w = 120$ [mm ³] $\equiv t = 57,14$ [s]								
parametr		$\Delta r_{kr} [\mathrm{mm}]$		$A_{kr} [\mathrm{mm}^2]$					
v _{ft} [m/min]	4	14	24	4	14	24	Minimalna liczebność próby		
\overline{x}	0,02395	0,02705	0,02895	0,014292	0,019459	0,033743	$3 - A_{kr}$		
$s^2(x)$	8,79E-06	1,02E-05	1,53E-05	3,38E-06	5,89E-06	2,25E-05			
t _{a,N-1}	2,093024	2,093024	2,093024	2,093024	2,093024	2,093024			
V	0,000571	0,000571	0,000571	0,000571	0,000571	0,000571			
n_0	0,015397	0,017795	0,026833	0,005922	0,010322	0,039442			
$n \ge$	0,015385	0,017779	0,026797	0,00592	0,010317	0,039365	v _{ft} [m/min]		
<i>n</i> =	1	1	1	1	1	1			
parametr		<i>RS_m</i> [mm]	1	$R_c [\mathrm{mm}]$					
v _{ft} [m/min]	4	14	24	4	14	24	Minimalna liczebność próby		
\overline{x}	0,544264	0,520849	0,584205	0,056017	0,058585	0,053886			
$s^2(x)$	0,001214	0,001539	0,001939	0,000859	0,001	0,001188	3- R ^m		
$t_{\alpha,N-1}$	2,093024	2,093024	2,093024	2,093024	2,093024	2,093024	2		
V	0,000571	0,000571	0,000571	0,000571	0,000571	0,000571	1-		
n_0	2,127412	2,696581	3,397559	1,504866	1,752555	2,082177			
$n \ge$	1,922875	2,3762	2,904199	1,399559	1,611355	1,885844	v _{ft} [m/min]		
<i>n</i> =	2	3	3	2	2	2			
parametr		l _{st} [mm]			<i>a_{zsr}</i> [mm]	-			
v _{ft} [m/min]	4	14	24	4	14	24	Minimalna liazohność próby		
\overline{x}	0,077481	0,084179	0,068379	0,001966	0,003632	0,00557			
$s^2(x)$	2,49E-05	3,86E-05	4,06E-05	2,19E-08	3,46E-08	5,29E-08	3 - 2		
$t_{\alpha,N-1}$	2,093024	2,093024	2,093024	2,093024	2,093024	2,093024	2-		
V	0,000571	0,000571	0,000571	0,000571	0,000571	0,000571			
n_0	0,043558	0,067703	0,071225	3,84E-05	6,06E-05	9,27E-05			
$n \ge$	0,043463	0,067474	0,070972	3,84E-05	6,06E-05	9,27E-05	v _{ft} [m/min]		
<i>n</i> =	1	1	1	1	1	1			

Tab. 4.6.1. Wyniki minimalnej liczebności próby dla różnych parametrów

(verte *)

Tab. 4.6.1. (ciąg dalszy)

$T1-250x32x9v_{ft} = \{4, 14, 2\}$	T1-250x32x98-99A60J7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC (100×20×8 mm), $v_s = 27,5$ [m/s], $a_e = 0,03$ [mm], $v_{ft} = \{4, 14, 24\}$ [m/min], $f_a = 0,3$ [mm/skok], $Q_c = 3 \times 10^{-3}$ [m ³ min ⁻¹], $V_w = 120$ [mm ³] $\equiv t = 57,14$ [s]									
parametr		K _{CPS}		EA_{RMS} [V]						
v _{ft} [m/min]	4	14	24	4	14	24	Minimalna liazahnaść prółu			
\overline{x}	0,018169	0,024924	0,02175	0,83045	1,1062	1,1121				
$s^2(x)$	1,04E-05	2,5E-05	3,04E-05	0,001574	0,00155	0,001995	3-			
t _{a,N-1}	2,093024	2,093024	2,093024	2,093024	2,093024	2,093024	2-			
V	0,000571	0,000571	0,000571	0,000571	0,000571	0,000571				
n_0	0,018207	0,043853	0,053285	2,758208	2,715622	3,495543				
$n \ge$	0,01819	0,043757	0,053143	2,423923	2,390973	2,975495	v _{ft} [m/min]			
<i>n</i> =	1	1	1	3	3	3				

Wymagana liczebność próby, odpowiadająca minimalnej liczbie powtórzeń pomiarów w badaniach eksperymentalnych, wyznaczona na podstawie wariancji wielkości poddanych analizie, jest równa największej obliczonej wartości n = 3.

4.6.2. Wyznaczenie parametrów i zakresu badań właściwych

Ten etap badań został podzielony na 3 logiczne części:

- badanie istotności wpływu poszczególnych czynników wejściowych na czynnik wyjściowy procesu szlifowania powierzchni,
- wyznaczenie rozpiętości badań ze względu na obciążenie ziaren ściernicy odpowiedzialne za charakter ich pracy,
- określenie zależności pomiędzy chropowatością powierzchni szlifowanej, a wartością skuteczną EA oraz składowymi siły szlifowania.

Badanie istotności czynników wejściowych

Badania istotności wpływu poszczególnych czynników wejściowych na czynnik wyjściowy wykonano w programie *Experiment Planner*, a przy ich realizacji utworzono 4 oddzielne analizy statystyczne, które odpowiadały następującym zależnościom:

- dla chropowatości powierzchni szlifowanej $R_{a(w)} = f(v_s, v_{ft}, a_e)$,
- wartości skutecznej emisji akustycznej $EA_{RMS} = f(v_s, v_{ft}, a_e)$,
- składowej stycznej siły szlifowania $F_c = f(v_s, v_{ft}, a_e)$,
- składowej normalnej siły szlifowania $F_n = f(v_s, v_{ft}, a_e)$.

Statyczny plan badań, oparty na prostokącie *Youdena* o wymiarach (poziomach czynników) 5×5×4, utworzono wprowadzając listę wartości czynników wejściowych:

- prędkości obwodowej ściernicy $v_s = \{25, 27, 5, 30, 32, 5, 35\}$ m/s,
- prędkości posuwu wzdłużnego $v_{ft} = \{4, 9, 14, 19, 24\}$ m/min,
- oraz styku roboczego $a_e = \{0,01, 0,02, 0,03, 0,04\}$ mm.

 Tab. 4.6.2.
 Plan badań eksperymentalnych oparty na prostokącie Youdena

l.p.	<i>v</i> _s [m/s]	v _{ft} [m/min]	<i>a_e</i> [mm]	l.p.	<i>v</i> _s [m/s]	v _{ft} [m/min]	<i>a_e</i> [mm]
1.	30	4	0,01	11.	25	4	0,03
2.	27,5	9	0,01	12.	35	9	0,03
3.	25	14	0,01	13.	32,5	14	0,03

(verte •)

l.p.	<i>v</i> _s [m/s]	v _{ft} [m/min]	<i>a_e</i> [mm]	l.p.	<i>v</i> _s [m/s]	v _{ft} [m/min]	<i>a_e</i> [mm]
4.	35	19	0,01	14.	30	19	0,03
5.	32,5	24	0,01	15.	27,5	24	0,03
6.	27,5	4	0,02	16.	35	4	0,04
7.	25	9	0,02	17.	32,5	9	0,04
8.	35	14	0,02	18.	30	14	0,04
9.	32,5	19	0,02	19.	27,5	19	0,04
10.	30	24	0,02	20.	25	24	0,04

Tab. 4.6.2. (ciąg dalszy)

Analizę statystyczną badań przeprowadzono ustalając ilość powtórzeń n = 3 oraz poziom istotności na poziomie $\alpha = 0,05$.

Realizując powyższy plan wprowadzono wyniki eksperymentów, nie rejestrując jednocześnie błędów grubych dla statystyk *Grubasa B*, B_4^+ , i B_6^+ , co oznacza, że żadna z wartości zmierzonych nie odbiegała znacznie od pozostałych wyników.

Tab. 4.6.3. Istotność czynników wejściowych

T1-250x32x98-99A60J7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC $v_s = \{25, 27, 5, 30, 32, 5, 35\}$ [m/s], $a_e = \{0,01, 0,02, 0,03, 0,04\}$ [mm], $v_{ft} = \{4, 9, 14, 19, 24\}$ [m/min], $f_a = 0,3$ [mm/skok], $Q_c = 3 \times 10^{-3}$ [m ³ min ⁻¹]								
czynnik weiściowy	R _{a(w)}	EA _{RMS}	F_c	F_n	wartość krytyczna <i>F</i> _{kr}	istotność		
	3 4182	0 0229	3 3914	2.3727	3.84	brak istotności		
v_{ft}	120,8201	31,8918	18,3853	17,7236	3,84	znaczący		
a_e	36,8353	11,9684	54,9629	51,8092	4,07	znaczący		

Istotność czynnika określa się przez porównanie wartości testu *Fishera-Snedecora* z wartością krytyczną testu $F_{kr}(\alpha, f_R, f_{A,B,C})$, gdzie liczbę stopni swobody określa się w następujący sposób:

- błąd (ang. *residue*):

$$f_{R} = f_{t} - (f_{A} + f_{B} + f_{C}), \qquad (4.6.1)$$

- suma (ang. *total*):

$$f_t = N - 1, (4.6.2)$$

dla czynników:

$$f_A = n_A - 1, \ f_B = n_B - 1, \ f_C = n_C - 1,$$
 (4.6.3)
- liczba doświadczeń,

gdzie: N

 n_A – liczba poziomów czynnika A (dla dobranego prostokąta *Youdena*: $n_A = 5$),

 n_B – liczba poziomów czynnika B (dla dobranego prostokąta *Youdena*: $n_B = 5$),

 n_C – liczba poziomów czynnika C (dla dobranego prostokąta *Youdena*: $n_C = 4$).

Z powyższego obliczono stopnie swobody oraz odpowiadającą im wartość krytyczną dla poszczególnych czynników wejściowych, otrzymując:

$$N = 20, f_t = 20 - 1 = 19,$$

$$f_A = 5 - 1 = 4, f_B = 5 - 1 = 4, f_C = 4 - 1 = 3,$$

$$F_{kr(0,05;8;4)} = 3,48 \text{ oraz } F_{kr(0,05;8;3)} = 4,07.$$

Porównanie wartości testu F z jego wartościami krytycznymi w przypadku wszystkich badanych obiektów wykazało, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o istotności $(F_{kr} < F)$ prędkości posuwu stołu szlifierki (v_{ft}) oraz wartości styku roboczego (a_e) , czyli głębokości szlifowania. Mają one statystyczny wpływ na rejestrowane sygnały wejściowe procesu (EA_{RMS} , F_c , F_n) oraz chropowatość powierzchni obrabianej ($R_{a(w)}$). Odrzucono natomiast hipotezę o istotności prędkości obwodowej ściernicy (v_s) na wyżej wymienione parametry.

Wyznaczenie rozpiętości badań

W przyjętych warunkach badań rozpoznawczych proces szlifowania przebiegał przy znacznej zmienności średniej głębokości skrawania przypadającej na jedno ziarno ścierne a_{zsr} (rys. 4.6.1). Było to wynikiem zmiennych wartości przyjętych parametrów szlifowania a_e , v_{ft} oraz v_s [PliJ1980]:

$$a_{zsr} = \left(\frac{v_{ft} \cdot (a_e)^{1/2} \cdot (RS_m)^2}{v_s \cdot K_{(\varepsilon,r)} \cdot tg(\varepsilon) \cdot (d_s)^{1/2}}\right)^{1/2} \left[\frac{\mathrm{mm}^{7/2} \cdot \mathrm{s}^{-1}}{\mathrm{mm}^{3/2} \cdot \mathrm{s}^{-1}}\right]^{1/2} = [\mathrm{mm}].$$
(4.6.4)

gdzie: azsr

r

– średnia elementarna głębokość skrawania, czyli średnia grubość warstwy skrawanej jednym ziarnem,

 $K(\varepsilon,r)$ – współczynnik kształtu ziarna (dla ziarna elektrokorundowego $K(\varepsilon,r) = 1,2,$

 ε – połowa kąta wierzchołkowego ziarna ściernego, dla ziarna elektrokorundowego $\varepsilon = 60^{\circ}$,

promień wierzchołka ziarna.

Tab. 4.6.4. Rozpiętość badań rozpoznawczych wyrażona zmiennością średniej głębokości skrawania przypadającej na jedno ziarno, dla różnych głębokości szlifowania

nr serii	<i>a_e</i> [mm]	$v_s[m/s]$	<i>v_{ft}</i> [m/min]	nr serii	<i>a_e</i> [mm]	v _s [m/s]	<i>v_{ft}</i> [m/min]
1.		30	4			25	4
		27,5	9			35	9
	0,01	25	14	3.	0,03	32,5	14
		35	19			30	19
		32,5	24			27,5	24
		27,5	4			35	4
		25	9			32,5	9
2.	0,02	35	14	4.	0,04	30	14
		32,5	19			27,5	19
		30	24			25	24



Rys. 4.6.1. Graficzna reprezentacja rozpiętości badań rozpoznawczych

Zmiany elementarnych głębokości skrawania w istotny sposób wpływają na charakter odkształceń w strefie mikroskrawania, czego odzwierciedleniem są duże rozproszenie samych sygnałów EA oraz zmienności wartości skutecznej EA_{RMS} (tab. 4.6.5, \Box 88).





Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Odczytana wartość krytyczna *F* z tablicy 13.6 w [Kuk2002], dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$, oraz dla danych stopni swobody:

$$r_1 = m - 1 = 2 - 1 = 1, (4.6.5)$$

$$r_2 = n - m = 5 - 2 = 3 \tag{4.6.6}$$

wyniosła: $F_{0,05;1;3} = 10,1$.

Porównując wartości testu F z jego wartością krytyczną oraz wysokie wartości współczynników korelacji otrzymanych dla równań opisujących składową normalną siły szlifowania F_n , można wywnioskować, że wszystkie równania regresji są statystycznie adekwat-

ne do danych ($F > F_{kr}$). Świadczą też o tym wartości p, które są mniejsze od przyjętej wartości poziomu istotności α .

Natomiast porównując wartości współczynników korelacji dla równań opisujących wartość skuteczną EA_{RMS} , można wywnioskować, że tylko równanie regresji dla serii nr 3, czyli dla styku roboczego równego $a_e = 0,03$ mm, jest statystycznie adekwatne do danych. Pozostałe równania posiadają niski współczynnik korelacji, a także nie przeszły pozytywnie testu relacji pomiędzy zmienną zależną, a zbiorem zmiennych niezależnych ($F < F_{kr}$). Oznacza to, że w tych przypadkach należy odrzucić hipotezę o istotności wyznaczonej zależności, a przyjąć hipotezę o jej nieistotności.

Z wyników badań można wywnioskować, także że dla różnych głębokości styku roboczego (a_e) przy stałej wartości (a_{zsr}), wartość skuteczna EA posiadała pasma wartości na wyższych poziomach. Ponadto, uwzględniała ona rozproszenie elementarnych głębokości skrawania ziaren aktywnych w strefie szlifowania, jak również informacje o wierzchołkach, które nie zainicjowały procesu skrawania, a jedynie były w kontakcie z powierzchnią obrabianą. Natomiast informacje pochodzące ze strefy szlifowania w przebiegach składowych siły szlifowania były bardziej wytłumione, a ich przebiegi mieszczą się w mniejszym paśmie zmienności dla wszystkich serii badań.

Różnice czasowe w reakcji czujników

W porównaniu do EA, sygnały składowych siły szlifowania były rejestrowane z wyraźnym opóźnieniem (wykres w tab. 4.6.6, \square 89). W początkowej fazie obróbki zauważyć można wyraźne zainicjowanie źródeł EA, a w konsekwencji zmiany nieprzetworzonego sygnału emisji akustycznej (EA_{RAW}) oraz bardzo wyraźny i szybki wzrost jego energii w postaci zmierzonej wartości skutecznej (EA_{RMS}). W tym czasie, wartości składowych siły szlifowania, narastały ze znacznym opóźnieniem w porównaniu do sygnału EA.



Tab. 4.6.6. Opóźnia układów pomiarowych w odniesieniu do układu EA

Przeprowadzone badania doświadczalne wykazały istnienie następujących opóźnień układów pomiarowych. Sygnał EA daje znacznie szybszą odpowiedź (posiada krótszy czas zwłoki) na zmiany zachodzące w strefie szlifowania, niż układy detekcji zbudowane w opar-

ciu o czujniki siły szlifowania. Przykładowo, przy założeniu, że czas aktualizacji stanu układu wynosi 0,05 ms (dla częstotliwości próbkowania f = 20 kHz), to zdarzenie kontaktu zostałoby wykryte przez czujnik wartości składowej normalnej siły szlifowania dopiero po 22, a składowej stycznej po 23 uaktualnieniach stanu układu detekcyjnego od momentu zaistnienia zdarzenia.

Ponadto, gdy wierzchołki ziaren ściernicach wchodzą w warstwę graniczną powierza i chłodziwa, które otaczają CPS, sygnał emisji akustycznej wyraźnie wzrasta. Wywołane to jest przez falę uderzeniową, która powstaje w wyniku turbulentnego przepływu powierza i chłodziwa w szczelinie pomiędzy powierzchnią ściernicy, a materiałem obrabianym. Także w początkowej fazie kontaktu ściernicy z powierzchnią szlifowaną, kiedy najwyżej położone ziarna wchodzą w interakcję z materiałem obrabianym, sygnał emisji akustycznej natychmiast reaguje w postaci wzrostu wartości. Na wykresie zamieszczonym w tablicy 4.6.6 (\Box 89), można wyróżnić opisywane zjawisko, które ma miejsce tuż przed rozpoczęciem właściwego procesu szlifowania. Brak reakcji czujnika siły szlifowania na zaistniałe zdarzenia, świadczy o przewadze, jaką posiada układ monitorujący sygnał EA, nad układami pozbawionymi tego typu czujników. W omawianym przypadku opóźnienie reakcji czujnika siły szlifowania jest znaczne i wynosi około 5 – 6 ms.

Określenie zależności pomiędzy chropowatością powierzchni szlifowanej, a wartością skuteczną EA i składowymi siły szlifowania

Wrażliwość sygnału EA_{RMS} na zmienność przekrojów elementarnych warstw skrawanych przekłada się również na dobrą jego korelację z chropowatością kształtowanej powierzchni (rys. 4.6.2), a tym samym zmiennymi warunkami kształtowania powierzchni wynikającymi m.in. z zużycia CPS. Jest ona większa, niż to ma miejsce dla składowych siły szlifowania F_n i F_c , przy zbliżonym charakterze przebiegu linii ich trendów.



Rys. 4.6.2. Zależności pomiędzy chropowatością powierzchni szlifowanej $(R_{a(w)})$, a wartością skuteczną EA_{RMS} i składowymi siły szlifowania F_n i F_c

Odczytana wartość krytyczna *Fishera-Snedecora* z tablicy 13.6 w [Kuk2002], dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$, oraz dla danych stopni swobody: $r_1 = m - 1 = 2 - 1 = 1$ oraz $r_2 = n - m = 20 - 2 = 18$ wynosi: $F_{0,05;1;18} = 4,41$. Porównując wartości testu z wartością krytyczną oraz wysokie wartości współczynników korelacji otrzymanych dla równań opisują-

cych składową normalną (F_n) i styczną (F_c) siły szlifowania, można wywnioskować, że wszystkie równania regresji są statystycznie adekwatne do danych ($F > F_{kr}$). Świadczą też o tym wartości p, które są mniejsze od przyjętej wartości poziomu istotności α .

Natomiast porównując wartości testu F z wartością krytyczną, jak i wartości współczynników korelacji dla równań opisujących wartość skuteczną EA_{RMS} , można wywnioskować, że równanie regresji jest statystycznie adekwatne do danych, ale posiada nieco niższą istotność statystyczną. Oznacza to, że w obu przypadkach (składowe siły jak i wartość skuteczna EA) należy przyjąć hipotezy o istotności wyznaczonych zależności, a odrzucić hipotezy alternatywne.

Z powyższych wyników badań można przyjąć, że wrażliwość sygnału RMS na zmienność przekrojów elementarnych warstw skrawanych przekłada się również na jego dobrą korelację z chropowatością kształtowanej powierzchni. Jest ona zbliżona do relacji wyznaczonych dla składowych siły szlifowania i charakteryzuje się podobnym charakterem przebiegu linii trendu. Wszystkie równania regresji, to funkcje wielomianowe 2. stopnia o współczynnikach wiodących (kierunkowych) o tym samum znaku, podobnie jak pozostałe współczynniki i wyraz wolny wielomianów.

4.6.3. Uproszczone modele matematyczne parametrów procesu

Wyniki badania istotności czynników wejściowych na czynniki wyjściowe procesu szlifowania, otrzymane w programie *Experiment Planner*, wykazały, że prędkość obwodowa ściernicy (v_s) jest statystycznie nieistotna. Dlatego też w dalszej części prac, w tym w badaniach rozpoznawczych, zdecydowano się ograniczyć wyliczenie modeli matematycznych obiektów badań do jednej, stałej prędkości obwodowej ściernicy $v_s = 27,5$ m/s. Dla wybranej prędkości ściernicy uzyskano pewność, że nawet przy znacznym ubytku objętości ściernicy (dochodzącym do $\Delta r_s = 50$ mm), na przemienniku częstotliwości nie trzeba będzie ustawiać większych wartości niż 50 Hz, co stanowi bezpieczną granicę dla pracy operatora, a wynikająca ze znacznego wzrostu obrotów wrzeciona szlifierki dla tej częstotliwości.

Statyczny plan eksperymentów właściwych, zrealizowano jako plan pięciopoziomowy kompozycyjny rotatabilny (5LRotExp – z ang. 5 *Levels Rotary Composite Experiment*), umożliwiając, tym samym, dokonanie identyfikacji badanych obiektów w postaci modeli nieliniowych.

l.p.	v _{ft} [m/min]	<i>a_e</i> [mm]	l.p.	v _{ft} [m/min]	<i>a_e</i> [mm]
1.	9	0,01	8.	14	0,01
2.	19	0,01	9.	14	0,01
3.	9	0,04	10.	14	0,01
4.	19	0,04	11.	14	0,01
5.	24	0,01	12.	14	0,01
6.	4	0,01	13.	14	0,01
7.	14	0,04			

 Tab. 4.6.7.
 Układ czynników wejściowych w pięciopoziomowym kompozycyjnym rotatabilnym planie badań eksperymentalnych

Dobierając postać modelu matematycznego badanego obiektu (MMBO) na podstawie wyników eksperymentu, program *Experiment Planner* oblicza współczynniki równania regresji wykorzystując funkcje zawarte w pracach [Kuk2000] oraz [Kuk2002].

Ponieważ przy zmianie modelu nie jest konieczna zmiana planu eksperymentu, dlatego postać funkcji modelu matematycznego dobrano po wykonaniu pomiarów. Wyboru najlepszego modelu dokonano wykorzystując do tego celu teorię wnioskowania statystycznego, porównując współczynniki korelacji wielowymiarowej wszystkich funkcji analizowanych przez program. Dodatkowo, korzystając z testu *F*, wyznaczono istotność współczynnika *R* dla każdego modelu, w celu sprawdzenia adekwatności formuły regresji do danych.

W załączniku do pracy (rozdz. Z.3.6.2) zgromadzono listę funkcji analizowanych przez program *Experiment Planner*, a także równania współczynników korelacji wielowymia-rowej oraz testu *Fishera-Snedecora*.

Dobór modelu matematycznego dla zmian chropowatości powierzchni

Wyniki pomiarów średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości przedmiotów obrobionych ($R_{a(w)}$) w procesie obwodowego szlifowania płaszczyzn w funkcji styku roboczego (a_e) i prędkości posuwu wzdłużnego stołu (v_{ft}) przedstawiono na rysunku 4.6.3 (\square 92). Powierzchnię przedstawioną na wykresie powierzchniowym utworzono w celu wstępnego ujawniania istniejących układów danych i ujawnienia współzależności pomiędzy trzema zmiennymi. W wyniku aproksymacji otrzymano poniższe równanie funkcji powierzchniowej, która z określonym błędem przybliża relację pomiędzy chropowatością powierzchni przedmiotu szlifowanego ($R_{a(w)}$), a nastawami procesu wyrażonymi posuwem wzdłużnym (v_{ft}) oraz głębokością szlifowania (a_e):

$$R_{a(w)} = 0.168 + 0.0052 \cdot v_{ft} + 2.6037 \cdot a_e. \tag{4.6.7}$$

Następnie wyznaczono model statystyczno-matematyczny opasujący badany obiekt. Ze wszystkich możliwych do wyznaczenia klas modelu wybrano ten, który spełniał następujące warunki:

- posiadał formułę regresji adekwatną do danych (wyznaczone na podstawie testu F),
- charakteryzował się najwyższą wartością współczynnika korelacji R,
- istotność wyznaczonego modelu była znacząca.



Rys. 4.6.3. Wyniki badań doświadczalnych wpływu styku roboczego (a_e) i prędkości posuwu osiowego stołu (v_{fi}) na chropowatość powierzchni przedmiotu obrobionego $(R_{a(w)})$: a) punktowy wykres rozrzutu 3D, b) wstępna powierzchnia 3D o dopasowaniu liniowym

Takim kryteriom, w przypadku modelu matematycznego dla zmian chropowatości powierzchni szlifowanej, odpowiadał model opisany funkcją potęgową:

$$R_{a(w)} = 0.3501 \cdot v_{ft}^{0.2163} \cdot a_e^{0.180}.$$
(4.6.8)

Współczynnik korelacji dla tej formuły posiadał statystyczną istotność, osiągając wartość R = 0.9836 przy spełnieniu testu $F: F = 148.3786 \ge F_{kr} = 4.1$. Istotność współczynników równania regresji obliczono przy pomocy testu *t-Studenta*. Obliczenia były wykonywane na poziomie istotności $\alpha = 0.05$ i liczny stopni swobody N - 1 = 10:

współczynnik	wartość	wartość rozkładu <i>t-Studenta</i>	wartość krytyczna	istotność
(0)	0,35006471	13,72	2,228	tak
Α	0,21633282	12,92	2,228	tak
В	0,18038745	14,76	2,228	tak

Tab. 4.6.8. Istotność współczynników formuły regresji dla chropowatości powierzchni

Wszystkie współczynniki formuły regresji opisującej chropowatość powierzchni przedmiotu szlifowanego okazały się statystycznie istotne.



Rys. 4.6.4. Graficzna reprezentacja wyznaczonego modelu chropowatości powierzchni

Ostatecznie porównano wyniki eksperymentów z wynikami funkcji regresji, dokonując tym samym oceny jakości modelu. W tabeli 4.6.9 (\square 93) zamieszczono porównanie wyników pomiarów badań z obliczeniami dla modelu chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego wyrażonym parametrem $R_{a(w)}$:

numer	średnia wartość	rezultat	przedział	różnica wartości z eksperymentu i modelu				
eksper.	z eksperymentu [µm]	z modelu [µm]	ufności (±)	bezwzględna [µm]	błąd względem eksperymentu [%]	błąd względem modelu [%]		
1.	0,2433	0,2454	0,0141	0,002	0,8%	0,8%		
2.	0,2733	0,2884	0,0156	0,0151	5,2%	5,5%		
3.	0,3067	0,3151	0,0117	0,0084	2,7%	2,7%		
4.	0,3733	0,3704	0,0134	-0,003	-0,8%	-0,8%		
5.	0,3167	0,3034	0,0162	-0,0133	-4,4%	-4,2%		
6.	0,21	0,2059	0,0131	-0,0041	-2,0%	-2,0%		
7.	0,3533	0,3467	0,0127	-0,0067	-1,9%	-1,9%		
8.	0,2733	0,27	0,0149	-0,0034	-1,2%	-1,2%		
9.	0,27	0,27	0,0149	0	0,0%	0,0%		
10.	0,28	0,27	0,0149	-0,01	-3,7%	-3,6%		
11.	0,2633	0,27	0,0149	0,0066	2,5%	2,5%		
12.	0,27	0,27	0,0149	0	0,0%	0,0%		
13.	0,2633	0,27	0,0149	0,0066	2,5%	2,5%		
			odchylenie:	0,0076	2,6%	2,7%		

Tab. 4.6.9. Porównanie modelu z wynikami eksperymentu dla $R_{a(w)}$

Stopień dopasowania wyznaczonego modelu matematycznego równania regresji dla chropowatości przedmiotu szlifowanego można uznać za wystarczający, ponieważ spełniony został warunek istotności współczynnika korelacji wielowymiarowej, istotności współczynników formuły regresji, a wartość błędu obliczona względem wyników eksperymentu była względnie niewielka bo wynosiła 2,6 % (co przekłada się na różnicę bezwzględną równą zaledwie 0,0076 µm).

Dobór modelu matematycznego dla wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej

Wyniki pomiarów średniej wartości skutecznej emisji akustycznej (EA_{RMS}) rejestrowanej w trakcie procesu obwodowego szlifowania płaszczyzn w funkcji głębokości szlifowania (a_e) oraz prędkości posuwu wzdłużnego stołu (v_{fl}) przedstawiono na rysunku 4.6.5 (\Box 94).



Rys. 4.6.5. Wyniki badań doświadczalnych wpływu styku roboczego (a_e) i prędkości posuwu osiowego stołu (v_{fi}) na wartość skutecznej emisji akustycznej (EA_{RMS}) : a) punktowy wykres rozrzutu 3D, b) wstępna powierzchnia 3D o dopasowaniu liniowym

W wyniku aproksymacji współzależności pomiędzy trzema zmiennymi otrzymano równanie funkcji powierzchniowej, która przybliża relację pomiędzy wartością skuteczną emisji akustycznej (EA_{RMS}), a nastawami procesu wyrażonymi posuwem wzdłużnym (v_{ft}) oraz głębokością szlifowania (a_e):

$$EA_{RMS} = 1,8623 + 0,051386 \cdot v_{ft} + 120,99 \cdot a_e.$$
(4.6.9)

Współczynnik korelacji dla tej formuły posiadał statystyczną istotność, osiągając wartość R = 0,998 przy spełnieniu testu $F: F = 1243,9337 \ge F_{kr} = 4,1$.

Tab. 4.6.10. Istotność współczynników formuły regresji dla wartości skutecznej EA

współczynnik	wartość	wartość rozkładu <i>t-Studenta</i>	wartość krytyczna	istotność
(0)	1,86228	6,908	2,228	tak
А	0,05138	3,076	2,228	tak
В	120,991	19,06	2,228	tak

Wszystkie współczynniki formuły regresji opisującej wartość skuteczną emisji akustycznej, rejestrowanej w trakcie procesu szlifowania, okazały się statystycznie istotne. Po obliczeniu modelu, ponownie wykonano trójwymiarowy wykres funkcji regresji dla czynników wejściowych procesu w zakresie podanym w trakcie tworzenia planu eksperymentu:



Rys. 4.6.6. Graficzna reprezentacja wyznaczonego modelu wartości skutecznej EA

Ostatecznie porównano wyniki eksperymentów z wynikami funkcji regresji, dokonując tym samym ocena jakości modelu. W poniższej tabeli zamieszczono porównanie wyników pomiarów z obliczeniami dla modelu *EA_{RMS}*:

numor	średnia wartość	rezultat	przedział	różnica wartości z eksperymentu i modelu				
eksper.	z eksperymentu [V]	z modelu [V]	ufności (±)	bezwzględna [V]	błąd względem eksperymentu [%]	błąd względem modelu [%]		
1.	3,6674	3,5347	0,1226	-0,1328	-3,8%	-3,6%		
2.	4,1579	4,0485	0,1226	-0,1093	-2,7%	-2,6%		
3.	7,1554	7,1644	0,1289	0,009	0,1%	0,1%		
4.	7,7429	7,6783	0,1289	-0,0647	-0,8%	-0,8%		
5.	4,4172	4,3054	0,1294	-0,1117	-2,6%	-2,5%		
6.	3,4146	3,2777	0,1294	-0,1368	-4,2%	-4,0%		
7.	7,3657	7,4213	0,1267	0,0557	0,7%	0,8%		
8.	3,7992	3,7916	0,1202	-0,0076	-0,2%	-0,2%		
9.	3,65	3,7916	0,1202	0,1416	3,7%	3,9%		
10.	3,7395	3,7916	0,1202	0,0521	1,4%	1,4%		
11.	3,6732	3,7916	0,1202	0,1184	3,1%	3,2%		
12.	3,7376	3,7916	0,1202	0,054	1,4%	1,4%		
13.	3,6593	3,7916	0,1202	0,1323	3,5%	3,6%		
			odchylenie:	0,0982	2,6%	2,8%		

Tab. 4.6.11. Porównanie modelu z wynikami eksperymentu dla EA_{RMS}

Stopień dopasowania wyznaczonego modelu matematycznego funkcji regresji dla wartości skutecznej EA można uznać za wystarczający, ponieważ spełniony został warunek istotności współczynnika korelacji wielowymiarowej, istotności współczynników formuły regresji, a wartość błędu obliczona względem wyników eksperymentu była względnie niewielka bo wynosiła 2,6% (co przekłada się na różnicę bezwzględną równą zaledwie 0,0982 V).

Dobór modelu matematycznego dla składowej stycznej oraz normalnej siły szlifowania

Wyniki pomiarów średniej wartości składowej stycznej siły szlifowania (F_c), rejestrowanej w trakcie procesu, w funkcji styku roboczego (a_e) i prędkości posuwu wzdłużnego stołu (v_{fl}) przedstawiono na rysunku 4.6.7 (\Box 94).

Chociaż jednostką siły są Newtony, to ze względu na specyfikę układu pomiarowego, odczyty wykonano w jednostkach napięcia (wolty). Ponieważ napięcie było wprost proporcjonalne do przyłożonego obciążenia (wraz ze zwrotem wektora obciążenia), w badaniach rozpoznawczych, których zadaniem była obserwacja jedynie względnych zmian, a nie konkretnych wartości siły w strefie szlifowania, nie dokonano zamiany na jednostki mechaniczne. Uwaga ta nie dotyczy badań właściwych, dla których dokonano przeskalowania wartości.



Rys. 4.6.7. Wyniki badań doświadczalnych wpływu styku roboczego (a_e) i prędkości posuwu osiowego stołu szlifierki (v_{ft}) na wartości składowej stycznej siły szlifowania (F_c) : a) punktowy wykres rozrzutu 3D, b) wstępna powierzchnia 3D o dopasowaniu liniowym

W wyniku aproksymacji współzależności pomiędzy trzema zmiennymi otrzymano równania funkcji powierzchniowej, które określają relację pomiędzy wartością składowej stycznej (F_c) oraz normalnej (F_n) siły szlifowania, a nastawami procesu wyrażonymi posuwem wzdłużnym (v_{ft}) oraz głębokością szlifowania (a_e).



Rys. 4.6.8. Wyniki badań doświadczalnych wpływu styku roboczego (a_e) i prędkości posuwu osiowego stołu szlifierki (v_{fi}) na wartości składowej normalnej siły szlifowania (F_n) : a) punktowy wykres rozrzutu 3D, b) wstępna powierzchnia 3D o dopasowaniu liniowym

W przypadku modeli matematycznych opisujących zmiany wartości obu składowych siły szlifowania, funkcje które posiadały formułę regresji adekwatną do danych, charaktery-

zowały się najwyższą wartością współczynnika korelacji *R*, a ich istotność była znacząca, odpowiadały modele odwzorowane funkcją potęgową:

$$F_c = 5,6429 \cdot v_{fl}^{0,38473} \cdot a_e^{0,57097}.$$
(4.6.10)

$$F_n = 7,8755 \cdot v_{\theta}^{0,41182} \cdot a_e^{0,6534} \,. \tag{4.6.11}$$

Współczynnik korelacji dla składowej stycznej posiadał statystyczną istotność, osiągając wartość R = 0.9842 przy spełnieniu testu F: $F = 154,4784 \ge F_{kr} = 4,1$. Natomiast dla składowej normalnej współczynnik korelacji osiągnął wartość R = 0.986 przy spełnieniu testu F: $F = 175,0947 \ge F_{kr} = 4,1$.

Wszystkie współczynniki formuły regresji opisującej zarówno składową styczną, jak i składowa normalną siły szlifowania, okazały się statystycznie istotne.

Tab. 4.6.12. Istotność współczynników formuły regresji dla składowej stycznej oraz normalnej siły szlifowania

współczynnik	wartość	wartość rozkładu <i>t-Studenta</i>	wartość krytyczna	istotność		
	składowa styczna siły szlifowania (F_c)					
(0)	5,64286	128,0	2,228	tak		
А	0,38472	13,29	2,228	tak		
В 0,57097		27,04	2,228	tak		
składowa normalna siły szlifowania (F_n)						
(0)	7,87554	108,6	2,228	tak		
A	0,41181	8,656	2,228	tak		
В	0,65339	18,82	2,228	tak		

Powierzchniowy wykres funkcji regresji dla czynników wejściowych (v_{ft} , a_e) w zakresie ustalonym w trakcie tworzenia planu eksperymentu, zamieszczono na rys. 4.6.9 (\square 97).



Rys. 4.6.9. Graficzna reprezentacja wyznaczonego modelu: a) składowej stycznej siły szlifowania, b) składowej normalnej siły szlifowania

Ostatecznie wyniki eksperymentów porównano z wynikami funkcji regresji, dokonując tym samym oceny jakości modelów. W tabeli 4.6.13 (\Box 98) zamieszczono porównanie wyników pomiarów z obliczeniami dla modelu składowej stycznej siły szlifowania (F_c):

numer	średnia wartość	rezultat	przedział	różnica wartości z eksperymentu i modelu			
eksper.	z eksperymentu [V]	z modelu [V]	ufności (±)	bezwzględna [V]	błąd względem eksperymentu [%]	błąd względem modelu [%]	
1.	0,9055	0,9477	0,2072	0,0422	4,5%	4,7%	
2.	1,1152	1,2633	0,2293	0,1482	11,7%	13,3%	
3.	1,9075	2,0914	0,172	0,1839	8,8%	9,6%	
4.	2,9183	2,7879	0,1975	-0,1303	-4,7%	-4,5%	
5.	1,178	1,3821	0,2375	0,2042	14,8%	17,3%	
6.	0,6668	0,6937	0,1929	0,0269	3,9%	4,0%	
7.	2,5965	2,4789	0,1861	-0,1176	-4,7%	-4,5%	
8.	1,1973	1,1233	0,2193	-0,074	-6,6%	-6,2%	
9.	1,1863	1,1233	0,2193	-0,063	-5,6%	-5,3%	
10.	1,1892	1,1233	0,2193	-0,0659	-5,9%	-5,5%	
11.	1,2059	1,1233	0,2193	-0,0826	-7,4%	-6,8%	
12.	1,1947	1,1233	0,2193	-0,0714	-6,4%	-6,0%	
13.	1,1948	1,1233	0,2193	-0,0715	-6,4%	-6,0%	
			odchylenie:	0,1115	7,6%	7,8%	

Tab. 4.6.13. Porównanie modelu z wynikami eksperymentu dla $F_{\rm c}$

Natomiast poniżej zamieszczono porównanie wyników pomiarów z obliczeniami uzyskanymi dla modelu opisującego zmiany składowej normalnej siły szlifowania (F_n):

numer	średnia wartość	rezultat	przedział	różnica wartości z eksperymentu i modelu			
eksper.	z eksperymentu [V]	z modelu [V]	ufności (±)	bezwzględna [V]	błąd względem eksperymentu [%]	błąd względem modelu [%]	
1.	0,9631	0,9604	0,2466	-0,0027	-0,3%	-0,3%	
2.	1,1926	1,3065	0,2729	0,1139	8,7%	9,5%	
3.	2,0782	2,376	0,2047	0,2978	12,5%	14,3%	
4.	3,4872	3,2321	0,235	-0,2551	-7,9%	-7,3%	
5.	1,2862	1,4384	0,2827	0,1522	10,6%	11,8%	
6.	0,6839	0,6877	0,2296	0,0038	0,6%	0,6%	
7.	3,0201	2,8501	0,2215	-0,17	-6,0%	-5,6%	
8.	1,2003	1,1521	0,2611	-0,0483	-4,2%	-4,0%	
9.	1,2019	1,1521	0,2611	-0,0498	-4,3%	-4,1%	
10.	1,1846	1,1521	0,2611	-0,0326	-2,8%	-2,7%	
11.	1,1941	1,1521	0,2611	-0,042	-3,6%	-3,5%	
12.	1,1951	1,1521	0,2611	-0,043	-3,7%	-3,6%	
13.	1,1779	1,1521	0,2611	-0,0259	-2,2%	-2,2%	
			odchylenie:	0,1327	6,3%	6,4%	

Tab. 4.6.14. Porównanie modelu z wynikami eksperymentu dla składowej normalnej siły szlifowania (F_n)

Stopień dopasowania wyznaczonego modelu matematycznego funkcji regresji dla składowej stycznej siły szlifowania (F_c) można uznać za wystarczający, ponieważ spełniony został warunek istotności współczynnika korelacji wielowymiarowej, istotności współczynników formuły regresji, a wartość błędu obliczona względem wyników eksperymentu wynosiła 7,6 %, co przekłada się na różnicę bezwzględną równą zaledwie 0,1115 V (co daje po przeliczeniu około 0,11 N).

Podobny rezultat otrzymano dla składowej normalnej siły szlifowania (F_n). W tym przypadku wartość błędu obliczona względem wyników eksperymentu wynosiła 6,3 %, co przekłada się na różnicę bezwzględną równą 0,1327 V (około 2,7 N).

4.7. Wnioski z badań rozpoznawczych

W wyniku przeprowadzonych badań rozpoznawczych określono przewagę rejestracji sygnału EA nad kontrolą składowych siły szlifowania w procesie, szczególnie odnośnie szybkości reakcji czujników tych wielkości wyjściowych. Opisano, także związki zachodzące między obserwowalnymi wartościami sygnału EA, a obciążeniami ściernicy w strefie obróbki. Analiza wyników badań pozwoliła na wstępne oszacowanie korelacji wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej z chropowatością powierzchni przedmiotu szlifowanego. Wyniki badań stanowiły również podstawę do określenia kierunku i warunków badań, które będą uwzględnione w badaniach zasadniczych.

Poniżej wymieniono najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych badań rozpoznawczych i analizy ich wyników:

- 1. Analiza wyników przeprowadzonych badań rozpoznawczych wykazała duży potencjał sygnału emisji akustycznej (w postaci wartości skutecznej), jak i pozostałych czynników wyjściowych procesu (składowe siły szlifowania), w zakresie monitorowania zmian za-chodzących w strefie obróbki. Przy czym, najkorzystniejszym ze względu na szybkość reakcji czujnika, a także na jego czułość, mierzoną wielkością amplitudy, okazały się pomiary sygnału EA. Wynika to z faktu, że w całym systemie nadzorowania procesu w czasie rzeczywistym (*on-line*) istotne są nawet najmniejsze opóźnienia, ponieważ ku-mulują się one i mogą doprowadzić do zbyt późnej reakcji układów sterujących obróbką. Dlatego też, niwelowanie opóźnień na każdym z etapów, w tym także w trakcie akwizycji sygnałów, jest bardzo istotne. Wyniki badań wyraźnie wykazały, że wykorzystanie analizy sygnału EA w trakcie obróbki zapewnia zaobserwowanie zjawisk zachodzących w strefie szlifowania nawet o 6 ms szybciej, niż ma to miejsce w przypadku czujników siły szlifowania.
- 2. Różne obciążenie ziaren aktywnych ściernicy, wywołane odpowiednim doborem parametrów szlifowania, powodowało odpowiednią reakcję czujników siły, emisji akustycznej oraz otrzymywaną w rezultacie chropowatość przedmiotów obrabianych. Zmiany te były wprost proporcjonalne do zastosowanych wartości parametrów obróbki.
- 3. Charakter rozproszenia i wartości samego sygnału EA oraz wartości skutecznej *EA_{RMS}* w bardzo dużym stopniu zależały od głębokości skrawania przypadającej na pojedyncze wierzchołki ziaren w strefie szlifowania, decydujących o przebiegu i wynikach obróbki. Wynika to z faktu, że proces szlifowania jest procesem losowym, a przede wszystkim ulegającym ciągłym zmianom ze względu na postępujące zużycie czynnej powierzchni ściernicy, zmianom podlega także obciążenie w strefie szlifowania. Zmienia się liczba wierzchołków aktywnych, a tym samym średnia głębokość skrawania pojedynczym ziarnem, a także starcie wierzchołków biorących udział w procesie. Wszystko to decyduje o jakości powierzchni otrzymanej po obróbce, w tym o chropowatości i naprężeniach zalegających w warstwie wierzchniej.
- 4. Zmiany elementarnych głębokości skrawania (a_{zsr}) w istotny sposób wpływają na charakter odkształceń w strefie mikroskrawania, czego odzwierciedleniem było duże rozproszenie samych sygnałów EA oraz zmienności wartości skutecznej EA_{RMS} .
- 5. Rezultaty eksperymentów poddane obróbce statystycznej oraz utworzone modele matematyczne badanych obiektów wykazały, że istnieje wyraźna zależność pomiędzy zmianami rejestrowanych sygnałów EA_{RMS} , F_c , i F_n , chropowatością powierzchni przedmiotu obrabianego ($R_{a(w)}$), a zadanymi nastawami procesu. Z wyników badań można wywnioskować, że wrażliwość sygnału RMS na zmienność przekrojów elementarnych warstw skrawanych przekłada się również na dobrą jego korelację z chropowatością kształtowanej powierzchni. Jest ona zbliżona do relacji wyznaczonych dla składowych siły szlifowania i charakteryzuje się podobnym charakterem przebiegu linii trendu.
- 6. Przeprowadzone badania rozpoznawcze i ich analiza, pozwoliły wprowadzić odpowiednie ograniczenia w zakresie niezbędnego obszaru kolejnych badań. Określono zakres parame-

trów procesu szlifowania i wymaganą liczbę powtórzeń eksperymentów dla etapu badań właściwych.

- 7. Wyniki minimalnej liczebności próby dla wybranych parametrów opisujących CPS oraz sygnałów wyjściowych procesu wahały się w przedziale 1 3. Oznacza to, że wymagana liczebność próby, odpowiadająca minimalnej liczbie powtórzeń pomiarów w badaniach eksperymentalnych, wyznaczona na podstawie wariancji wielkości poddanych analizie, jest równa największej obliczonej wartości, czyli w analizowanym przypadku n = 3.
- 8. Istotność zastosowanych wielkości wejściowych procesu obwodowego szlifowania płaszczyzn na rejestrowane wielkości wyjściowe procesu: F_c , F_n , EA_{RMS} , $R_{a(w)}$ wykazała, że prędkość obwodowa ściernicy (v_s) jest statystycznie nieistotna. Z tego względu w dalszej części prac, w tym w badaniach rozpoznawczych, zdecydowano się ograniczyć eksperymenty do stałej prędkości obwodowej ściernicy $v_s = 27,5$ m/s.
- 9. Analiza wyznaczonych funkcji regresji opisujących wpływ zmian elementarnych głębokości skrawania (a_{zsr}) na charakter rejestrowanych sygnałów wyjściowych procesu (F_c , F_n i EA_{RMS}), wykazała, że tylko równanie regresji dla serii numer 3 (czyli $a_e = 0,03$ mm) jest statystycznie adekwatne dla wszystkich parametrów. Dlatego też, badania właściwe ograniczono, przyjmując styk roboczy jako stałą, równą powyższej wartości.
- 10. Po przeprowadzaniu badań wstępnych, zdecydowano się także ograniczyć zakres badanych warunków, zmniejszając ilość wartości posuwu wzdłużnego stołu do dwóch skrajnych i jednej pośredniej ($v_{ft} = \{4, 14, 24\}$ m/min) w porównaniu do przeanalizowanych warunków w badaniach rozpoznawczych.

Ponieważ kształtowanie powierzchni przedmiotu szlifowanego, to kinematycznie uwarunkowane zdejmowanie warstwy materiału, przy wykorzystaniu zdolności skrawnych ziaren aktywnych czynnej powierzchni ściernicy, można wywnioskować o istnieniu zależności pomiędzy parametrami sygnału EA (rejestrowanymi podczas szlifowania), a zmianami w strefie szlifowania wyrażonymi zużyciem geometrycznym ściernicy oraz wynikami obróbki (chropowatość i naprężenia powierzchni przedmiotu obrabianego). Zmiany właściwości skrawnych ściernicy w wyniku jej zużycia, mają wpływ na charakter i intensywność zjawisk zachodzących w strefie szlifowania. Praca ściernicy w warunkach samoostrzenia, charakteryzuje się wzrostem ilości aktywnych wierzchołków ziaren, a zarazem zmniejszeniem przekrojów warstw skrawanych. Z kolei zużycie ściernicy o charakterze postępującego tępienia wierzchołków ziaren, charakteryzuje się wzrostem ich powierzchni starcia i zwiększeniem przekrojów warstw skrawanych. Oczywistym jest, że w zależności od intensywności zużycia ściernicy, różny będzie udział zjawisk związanych z odkształceniami plastycznymi, tarciem, pekaniem i rozrywaniem materiału. Może zdarzyć się tak, iż mimo odmiennych charakterów zużycia ściernicy siły szlifowania będą miały porównywalne wartości. Natomiast sygnały emisji akustycznej będą wyraźniej obrazowały charakter zużycia i pracy ziaren ściernych. Określenie tych zależności pozwoli na opracowanie systemu nadzorowania procesu szlifowania, umożliwiającego adaptacyjne sterowanie nastawnymi szlifierki. W tym celu, zaistniała konieczność uwzględnienia, w takim systemie, zużycia narzędzia ściernego, co jest głównym tematem badań właściwych realizowanych w ramach niniejszej pracy.

4.8. Wyniki badań właściwych i ich analiza

Badania oraz ich szczegółowe analizy okazały się bardzo obszerne, dlatego większość wykresów i wyników statystycznych, zamieszczono w załączniku do pracy. Uwaga ta dotyczy całej pracy, w szczególności wyników badań właściwych.

Wyniki badań właściwych przeanalizowano w aspekcie wpływu zużycia badanych ściernic, zachodzącego w procesie szlifowana, na zmiany stanu czynnej powierzchni ściernicy w obszarze jej makro- i mikrogeometrii, zmiany wielkości charakterystycznych procesu szlifowania oraz jakość powierzchni przedmiotu obrabianego obejmującą chropowatość i stan naprężeń warstwy wierzchniej.

Przeprowadzona analiza wykazała, że w zależności od stopnia twardości ściernicy (J lub M) oraz prędkości posuwu wzdłużnego stołu szlifierki ($v_{fl} = 4$, 14 oraz 24 m/min), badane ściernice charakteryzowały się różnym okresem trwałości (t_{max}) – rys. 4.8.1 (\Box 101).



Rys. 4.8.1. Okresy trwałości badanych ściernic w funkcji posuwu wzdłużnego stołu szlifierki (v_{ft}): a) ściernica o twardości J, b) ściernica o twardości M

Za całkowitą utratę zdolności skrawnej przyjęto moment, w którym na całej powierzchni przedmiotu obrabianego pojawiały się przypalenia (rys. 4.8.2, 101). Arbitralnie uznano, że w tym momencie ściernica nie skrawała materiału, a stępione wierzchołki ziaren ściernych jedynie tarły i bruzdowały materiał obrabiany. W rezultacie tego wzrastała temperatura w strefie styku ściernicy z przedmiotem, a w konsekwencji zachodziły zmiany stanu warstwy wierzchniej.

a)



Rys. 4.8.2. Otrzymane powierzchnie próbki po szlifowaniu przy wysokiej zdolności skrawnej CPS (a) oraz charakteryzująca się przypaleniami, które wyznaczyły koniec okresu trwałości ściernicy (b)

Wyniki badań wykazały także, że dla danych parametrów i warunków szlifowania, dla kolejnych powtórzeń eksperymentu, każda ze ściernic charakteryzowała się zbliżonym okresem trwałości. W celach porównawczych, największy okres trwałości przyjęto za 100% i do tej wartości odniesiono pozostałe wyniki (tab. 4.8.1, D102).

T1-250x32x98-99A60J7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5$ [m/s], $a_e = 0,03$ [mm], $v_{ft} = \{4, 14, 24\}$ [m/min], $f_a = 0,3$ [mm/skok], $Q_c = 3 \times 10^{-3}$ [m ³ min ⁻¹]					T1-250x32x98-99A60M7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5$ [m/s], $a_e = 0,03$ [mm], $v_{f1} = \{4, 14, 24\}$ [m/min], $f_a = 0,3$ [mm/skok], $Q_c = 3 \times 10^{-3}$ [m ³ min ⁻¹]				
		1	1				1		
	<i>v</i> _{ft} [m/min]	t _{max} [S]	wartos	ść i różnica, [%]		v _{ft} [m/min]	t _{max} [s]	wartość	i różnica, [%]
	$\frac{v_{ft} [m/min]}{4 (n.d.)}$	<i>t_{max}</i> [s] 1011,4	wartos 100%	ść i różnica, [%] (n.d.)		$\frac{v_{ft} [\mathbf{m}/\mathbf{min}]}{4 (n.d.)}$	<i>t_{max}</i> [s] 211,4	wartość 30,68%	i różnica, [%] (-69,32%)
	<i>v_{ft}</i> [m/min] 4 (n.d.) 14 (+350%)	<i>t_{max}</i> [s] 1011,4 517,54	wartos 100% 51,17%	ść i różnica, [%] (n.d.) (-48,83%)		v _{ft} [m/min] 4 (n.d.) 14 (+350%)	t _{max} [s] 211,4 688,97	wartość 30,68% 100%	i różnica, [%] (-69,32%) (n.d.)
	v _{ft} [m/min] 4 (n.d.) 14 (+350%) 24 (+600/171,42%)	<i>t_{max}</i> [s] 1011,4 517,54 319,83	wartos 100% 51,17% 31,62%	<mark>ść i różnica, [%]</mark> (n.d.) (-48,83%) (-68,38/19,55%)		<i>t_{max}</i> [s] 211,4 688,97 501,9	wartość 30,68% 100% 72,85%	i różnica, [%] (-69,32%) (n.d.) (-27,15%)

Tab. 4.8.1. Maksymalny okres trwałości ściernic do pojawienia się przypaleń

Otrzymane wyniki wskazują na odwrotnie proporcjonalną zależność czasu utrzymywania zdolności skrawnej do wartości zastosowanego posuwu wzdłużnego. Im większa dynamika przebiegu procesu, tym ściernice szybciej traciły zdolność skrawną, co powiązane jest z krótszym czasem pracy do momentu zaobserwowania przypaleń szlifierskich na powierzchni obrabianych próbek. Było to spowodowane większą intensywnością zużycia ściernic w wyniku wzrostu średniej grubości warstwy skrawanej przypadającej na pojedynczy wierzchołek ziarna ściernego (rys 4.8.3, D102).





Proces szlifowania przebiegał przy relatywnie niedużej zmienności średniej elementarnej głębokości szlifowania w funkcji czasu pracy ściernicy. Było to wynikiem ograniczenia zmienności parametrów szlifowania tylko do różnych wartości posuw stycznego (v_{fi}) przyjętych w trakcie realizacji badań właściwych. Dla obu ściernic obciążenie ziaren ściernych znajdowało się w zbliżonym zakresie dla każdej z przyjętych wartości parametru v_{fi} . Oznacza to, że ściernice przebadano w zbliżonych warunkach pracy, a wyniki obróbki mogą zostać poddane porównaniom, szczególnie w odniesieniu do tych samych prędkości posuwu stycznego. W takich warunkach, pomimo zachodzącego procesu samoostrzenia spowodowanego zużyciem wytrzymałościowym wierzchołków ziaren aktywnych, zachodzi proces zalepiania CPS wiórami o dużej objętości. Właściwości skrawne ściernicy znacząco obniżają się, co prowadzi do zakończenia okresu trwałości. Uogólniając zarejestrowane wyniki maksymalnego okresu trwałości, można stwierdzić, że skrócenie czasu utrzymywania zdolności skrawnej przez ściernicę, wraz ze wzrostem wartości posuwu wzdłużnego rzędu 1,7×, wynosi około 25 – 30%. Wyjątek stanowi ściernica o nominalnej twardości M pracująca z prędkością posuwu $v_{fi} = 4$ m/min, dla której zarejestrowano bardzo krótki czas prawidłowej pracy, wynoszący około 3,5 minuty. Prawdopodobnie, w tym przypadku obciążenie wierzchołków ziaren było na tyle małe, że ściernica pracowała w warunkach postępującego tępienia z intensywnym zalepianiem jej powierzchni czynnej.

Pomimo znaczącej regresji okresu trwałości ściernic (t_{max}) w funkcji przyrostu prędkości posuwu stycznego stołu (v_{ft}), dobrane parametry obróbki przyczyniły się do znaczącego wzrostu całkowitego ubytku materiału obrabianego (V_w), a co za tym idzie, także szybkości tego ubytku (parametr Q_w – wydajność objętościowa szlifowania) – tab. 4.8.2 (\Box 103).



Tab. 4.8.2. Czas pracy ściernic, ubytek materiału obrabianego (V_w) oraz szybkość tego ubytku (Z_w) w zależności od dobranej prędkości posuwu stycznego (v_{fi})

Powyższe wyniki świadczą o eskalacji wydajności objętościowej szlifowania (Q_w) w funkcji posuwu stycznego stołu. Oznacza to, że kolejne zastosowane parametry przebiegu procesu spowodowały spadek ogólnego czasu pracy ściernicy do momentu utraty zdolności skrawnych, ale dzięki zwiększonej wydajności, pozwoliły usunąć większą ilość materiału wyrażoną parametrem ubytku materiału.

Przebiegi wykresów, już na tym etapie analizy wyników badań, wykazały odmienny charakter pracy oraz związane z powyższym odróżnialne formy zużycia ściernic. Ściernica o nominalnie niższej twardości (99A60J7V) ulegała wyraźniejszemu wpływowi zużycia wytrzymałościowego, co wiązało się z szybszą utratą ziaren, całkowity czas pracy narzędzia ulegał systematycznemu spadkowi, a ubytek materiału wzrastał przy coraz większej dynamice przebiegu procesu. Natomiast ściernica twardsza (99A60M7V) względnie dłużej utrzymywała ziarna w swojej strukturze, co odzwierciedliło się wydłużeniem całkowitego czasu szlifowania do momentu utraty zdolności skrawnych oraz znaczącemu zwiększeniu objętości materiału, który został usunięty w procesie szlifowania.

4.8.1. Analiza zmian stanu geometrii CPS

Ponieważ rozróżniamy dwie typowe formy zużycia występujące równolegle, zwykle z przewagą jednego z nich, w niniejszej pracy wykonano pomiary oraz analizę zużycia geometrii ściernic. Zbadano zużycie ścierne powodowane procesami tarcia i ścierania (skala mikro) oraz zużycie wytrzymałościowe, opierające się na przekroczeniu miejscowych wytrzymałości ziaren i spoiwa, a objawiające się wykruszeniami lub łupaniem całych ziaren (skala makro).

Geometryczne skutki zużycia ściernego i wytrzymałościowego, a także wzajemne ich udziały w zużyciu całkowitym, determinują określony stan geometrii CPS, który z kolei warunkuje kształt, ilość oraz rozłożenie wierzchołków ziaren w strefie szlifowania, a w konsekwencji rozkład sił w układzie ściernica-przedmiot obrabiany. Dlatego też, do oceny postępującego zużycia ziaren ściernych wykorzystano fakt zaistnienia zmian zdolności skrawnych ściernicy poprzez wyznaczenie geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnych (K_{CPS}) dla kolejnych punktów pomiarowych:

$$K_{CPS} = \frac{S_{st} \cdot a_{zsr} \cdot R_c}{l_{st} \cdot B_{kr}} \left[\frac{\text{mm} \cdot \text{mm}}{\text{mm} \cdot \text{mm}} = 1 \right].$$
(4.8.1)

Ponieważ przyjęty wskaźnik K_{CPS} w swojej formule ujmuje związki między parametrami charakterystycznymi dla mikro- i makrogeometrii, to analiza tego wskaźnika stanowi syntezę zmian topografii CPS (rys. 4.8.4, \Box 104).



Rys. 4.8.4. Zmiany wskaźnika zdolności skrawnych K_{CPS} w funkcji czasu pracy badanych ściernic
wraz z prawdopodobnymi punktami samoostrzenia(verte •)

Rys. 4.8.4. (ciąg dalszy)



Analizując zmiany wartości wskaźnika zdolności skrawnych można jednoznacznie stwierdzić, że geometryczne skutki zużycia CPS powodują modyfikację właściwości skrawnych narzędzia, co z pewnością wpływa na przebieg procesu i wyniki szlifowania. Na wykresach wyraźnie widać spadek wskaźnika K_{CPS} następujący wraz z upływem czasu pracy badanych ściernic, co świadczy o pogarszaniu się stanu ich powierzchni czynnych, a w konsekwencji własności skrawnych. Zmiany te są szczególnie intensywne w początkowej fazie pracy ściernic (pierwsze 100 s).

W skutek zaistnienia zużycia typu ściernego, zdolności skrawne ściernicy maleją monotonicznie wraz z upływem czasu jej pracy. Natomiast w przypadku wystąpienia zużycia wytrzymałościowego, zdolności skrawne mają przebieg niemonotoniczny. Posiadają ogólną tendencję malejącą, ale w ich przebiegach mogą występować przypadki, gdy w pewnym zakresie czasu pracy ściernicy wydajność skrawania wzrasta, co objawia się także wzrostem wartości wskaźnika zdolności skrawnych. Są to tzw. punkty samoostrzenia, czyli samoistnego odnowienia zdolności skrawnych ściernicy.

Na wykresach reprezentujących zmiany wskaźnika K_{CPS} wyraźnie widać pogarszające się zdolności skrawne, które otrzymano dla obu ściernic wraz z upływem czasu szlifowania, przy czym tempo i charakter zużycia w znacznej mierze zależały do dynamiki przebiegu procesu, czyli od parametrów procesu. Różnice ujawniają się szczególnie w przypadku ściernicy miękkiej (o twardości J), dla której zmiana prędkości posuwu stycznego (v_{fl}) oznaczała nie tylko zaistnienie różnego okresu trwałości ściernicy (jak to mam miejsce w przypadku ściernicy 99A60M7V), ale także zauważalną zmianę intensywności spadku zdolności skrawanych. Utrata zdolności skrawnych, wyrażona ich wskaźnikiem, a także ich intensywność wykazały wprost proporcjonalne zależności do prędkości posuwu stycznego, czyli dynamiki przebiegu procesu. W przypadku ściernicy o większej twardości (99A60M7V) nie zauważono znaczących różnic w tempie utraty zdolności skrawnych, bez względu na zastosowaną prędkość posuwu stycznego stołu szlifierki. Należy podkreślić w tym miejscu, że ściernica 99A60M7V nie pracowała prawidłowo z prędkością $v_{fl} = 4$ m/min. Dlatego też, pomiarów dokonanych w tych warunkach nie należy uwzględniać w ścisłych analizach wyników badań, a jedynie interpretować w sposób ogólny, często tylko posiłkowy.

W przebiegach wskaźnika K_{CPS} dla obu ściernic zanotowano istnienie lokalnych, okresowych wzrostów wartości zdolności skrawnej. Zmiany te podyktowane były wytrzymałościowym charakterem pracy ściernic, co wiązało się z zaistnieniem procesów samoostrzenia. Wyniki badań wykazały, że niemal dla każdego wykonanego powtórzenia eksperymentów, zaistniały wyraźne punkty samo-odnowienia ściernicy, czyli wzrostu zdolności skrawnych w domenie czasu jej pracy. Przyrosty wskaźnika były znacznie większe dla ściernicy o nominalnie większej twardości (99A60M7V).

Szczególnym przypadkiem okazało się szlifowanie przy udziale ściernicy 99A60M7V z prędkością posuwu $v_{ft} = 24$ m/min. W tym przypadku, dynamizm przebiegu procesu powodował, że na skutek zaistnienia oporu skrawania, znacznie przekraczającego siły mocowania ziaren przez spoiwo w strukturze ściernicy, następowały znaczne wykruszenia oraz odsłonięcie kolejnych ostrzy wierzchołków ziaren. Pozwoliło to ściernicy uzyskać większą wydajność i względnie dłuższy okres pracy do pojawienia się przypaleń szlifierskich na powierzchni obrabianej.

W wybranych lokalnych punktach, siły działające w strefie szlifowania powodowały wykruszenia lub wyrywanie dotychczas pracujących ziaren, a w rezultacie odsłonięcie nowych wierzchołków o ostrych krawędziach. W ten sposób ściernice w pewnym stopniu odzyskiwały swoje wyjściowe (nadane w trakcie zabiegu obciągania) zdolności skrawne. Punkty te, odpowiadające kolejnym punktom pomiarowym, czasowi szlifowania oraz ubytkowi materiału, zestawiono w tablicy 4.8.3 (\Box 106). Wykaz ten obejmuje nawet minimalne wzrosty parametru K_{CPS} .

ściernica/	v _{ft}	nr	punkty	całkowita
warunki badań	[m/min]	powtórzenia	samoostrzenia ¹⁰	liczba punktów
		1.	4, 8	
T1-250x32x98-	4	2.	5, 8	9
99A60J7V-42m/s,		3.	brak	
NC10 (60±2) HRC,		1.	3, 5, 9, 14	
$v_s = 27,5 \text{ [m/s]},$	14	2.	5, 9, 11, 14	14
$a_e = 0,03 \text{ [mm]},$		3.	7, 8, 13, 14	
$f_a = 0.3 [\text{mm/skok}],$		1.	6, 8	
$Q_c = 3 \times 10^{-3} [\text{m}^3 \text{min}^{-1}]$	24	2.	5, 7, 9	9
		3.	5, 8	
		1.	brak	
T1-250x32x98-	4	2.	2	3
99A60M7V-42m/s,		3.	brak	
NC10 (60±2) HRC,		1.	5, 6, 9, 13, 15, 16	
$v_s = 27,5 \text{ [m/s]},$	14	2.	3, 5, 7, 11, 13, 15	16
$a_e = 0.03 \text{ [mm]},$		3.	4, 6, 8, 12, 15	
$f_a = 0.3 [\text{mm/skok}],$		1.	3, 7, 8, 10, 11, 13, 17	
$Q_c = 3 \times 10^{-3} [\text{m}^3 \text{min}^{-1}]$	24	2.	2, 4, 6, 9, 13, 14	18
		3.	2, 7, 8, 12, 14, 16	

Tab. 4.8.3. Zestawienie domniemanych, lokalnych punktów odnowień CPS wykonane w oparciu o zmiany wskaźnika zdolności skrawnych K_{CPS}

Przyjmując założenie, że każdemu wzrostowi wartości parametru K_{CPS} (bez względu na jego intensywność) odpowiadało zjawisko samoostrzenia, a na pewno w danym momencie następowała poprawa zdolności skrawnych ściernicy, to po ilości odnotowanych punktów można wnioskować, że ściernica o nominalnie większej twardości (99A60M7V) charakteryzowała się lepszymi zdolnościami skrawnymi w analizowanych warunkach. W całym swoim okresie trwałości, jej zużycie charakteryzowało się większą ilością punktów samoostrzenia. Jest to typowa cecha ściernicy, która pracuje w warunkach zużycia wytrzymałościowego.

Jednakże, biorąc po uwagę całkowity czas pracy obu ściernic oraz ich wydajność objętościową (Q_w – rozdz. 4.2.4, \square 61), relacja ulega odwróceniu. Z powyższego wynika, że ściernica o nominalnie mniejszej twardości (99A60J7V) charakteryzowała się przewagą zu-

¹⁰ Kolejne numery punktów pomiarowych rejestrowanych chronologicznie w funkcji czasu pracy ściernicy. Tabele odnoszące numer kolejnego punktu pomiarowego do czasu szlifowania i ubytku materiału zamieszczono w rozdziale 4.2.4 niniejszej pracy (tab. 4.2.6 – tab. 4.2.11, D63 – 65).

życia wytrzymałościowego przechodzącego w zużycie ściernie na końcu okresu trwałości narzędzia, natomiast czynna powierzchni ściernicy 99A60M7V ulegała głównie zużyciu ściernemu z jednoczesną tendencją do odnowień.

Fakt ten potwierdzony jest poprzez dłuższe utrzymywanie ziaren ściernych przez mostki spoiwa, co odzwierciedliło się w wyraźnie wydłużonym okresie utrzymywania zdolności skrawnych przez ściernicę o nominalnie większej twardości, a to z kolei przyczyniło się do odnotowania względnie dużej ilości przyrostów omawianego parametru K_{CPS} .

Zmiany mikrogeometrii CPS

Analiza zmian czynnej powierzchni ściernicy w skali mikrogeometrii okazała się trudna ze względu na wytrzymałościowy charakter pracy, jak i formy zużycia narzędzia. Z tego względu większość parametrów opisujących zmiany profili CPS charakteryzowały się dużymi rozrzutami oraz mało wyraźnymi trendami zmian.

Jednakże na potrzeby niniejszej pracy zdecydowano się zastosować pewne uproszczenia w postaci naniesienia liniowej linii trendu na uśrednione wyniki pomiarów. Linie te wskazały kierunek zmian, które trudno zaobserwować dla parametrów o znacznym odchyleniu standardowym (rys. 4.8.5 - 4.8.11, $\Box 107 - 109$).



Rys. 4.8.5. Trendy zmian uśrednionych wartości średniego odstępu miejscowych wzniesień profilu $(RS_{m(s)})$ dla rozpatrywanych warunków pracy badanych ścienic



Rys. 4.8.6. Trendy zmian uśrednionych wartości średniej wysokości wzniesień profilu (R_c) dla rozpatrywanych warunków pracy badanych ścienic



Rys. 4.8.7. Trendy zmian uśrednionych wartości średniej arytmetycznej rzędnych profilu $(R_{a(s)})$ dla rozpatrywanych warunków pracy badanych ścienic



Rys. 4.8.8. Trendy zmian uśrednionych wartości wysokości profilu chropowatości według 10. punktów $(R_{z(s)})$ dla rozpatrywanych warunków pracy badanych ścienic



Rys. 4.8.9. Trendy zmian uśrednionych wartości wariancji rzędnych wzniesień profilu $(D^2_{(z)})$ dla rozpatrywanych warunków pracy badanych ścienic


Rys. 4.8.10. Trendy zmian uśrednionych wartości liczby wierzchołków ostrzy statycznych (S_{st}) dla rozpatrywanych warunków pracy badanych ścienic



Rys. 4.8.11. Trendy zmian uśrednionych wartości starcia względnego wzniesień profilu (l_{st}) dla rozpatrywanych warunków pracy badanych ścienic

Analiza linii trendu na poszczególnych wykresach, pozwoliła utworzyć tablicę zmian reprezentującą ogólne tendencje charakteryzujące analizowane parametry w funkcji czasu pracy ściernic w rozpatrywanych warunkach badań (tab. 4.8.4, D109).

Tab. 4.8.4.Tablica zmian reprezentująca ogólne tendencje przebiegu parametrów mikrogeometrii CPS
w funkcji czasu pracy ściernic w badanych warunkach

	T1-250x32x98-5 NC10 (60 \pm 2) HI $v_s = 27,5$ [m/s], $a_s = 0,3$ [mm/skc	99A60J7V-42m/s, RC, $a_e = 0.03 \text{ [mm]},$ bk], $Q_c = 3 \times 10^{-3} \text{ [m^2]}$	³ min ⁻¹]	T1-250x32x98-99A60M7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27.5$ [m/s], $a_e = 0.03$ [mm], $f_a = 0.3$ [mm/skok], $Q_c = 3 \times 10^{-3}$ [m ³ min ⁻¹]			
	$v_{ft} = 4 [m/min]$	$v_{ft} = 14 [m/min]$	$v_{ft} = 24 [m/min]$	$v_{ft} = 4 [m/min]$	$v_{ft} = 14 [m/min]$	$v_{ft} = 24 [m/min]$	
$RS_{m(s)}$	$\mathbf{\lambda}_1$	≠ 2	≠ 1	≠3	≠ 1	≠ 1	
R _c	2	2	₹3	\searrow_2	≠ 2	$\mathbf{\lambda}_1$	
R _{a(s)}	2	2	2	13	≠ 2	$\mathbf{\lambda}_1$	
R _z	2	2	3	12	12	X 0	
$\boldsymbol{D}^{2}_{(z)}$	\ 4	₹5	2	12	12	X 0	
S _{st}	1	2	$\mathbf{\lambda}_1$	2	$\mathbf{\lambda}_1$	$\mathbf{\lambda}_1$	
l _{st}	13	≠ 1	≠3	13	≠ 2	≠3	

Indeksy przy strzałkach reprezentują siłę tendencji malejącej lub wzrostu w odniesieniu do braku takich skłonności: 1 - lekki wzrost/spadek, 5 - bardzo silny wzrost/spadek wartości, 0 - reprezentuje przypadki, w których trudno było jednoznacznie stwierdzić jak zachowuje się dana zmienna w funkcji czasu. W przypadku odnotowania wyraźnych zmian kierunku linii trendu, zamieszczono większą ilość indeksów, odpowiadającą ilości zaobserwowanych zwrotów. Powyższe wytyczne dotyczą zarówno powyższej tablicy, jak i analogicznych analiz zrealizowanych w dalszej części niniejszej pracy.

Ściernica J dla $v_{ft} = 4$ m/min

W tym przypadku zaobserwowano lekko malejące odległości między wzniesieniami profilu ($RS_{m(s)}$), co oznacza, że wierzchołków nieznacznie przybywało w efekcie zjawiska samoostrzenia. Ponieważ równocześnie malały wysokości wzniesień (R_c), można przypuszczać, że dochodziło do wykruszania wierzchołków ziaren, a nie do ich wyrywania. Zmiany parametrów $R_{a(s)}$ i $R_{z(s)}$ wskazują na obniżenie profilu w funkcji czasu pracy ściernicy. Wariancja rzędnych wzniesień profilu ($D_{(z)}^2$) wskazuje na znaczący spadek wysokości wzniesień, co oznacza, że ściernica ulegała stopniowemu zużyciu z przewagą zużycia ściernego (następowały tzw. mikrowykruszenia ziaren). Potwierdzają to zmiany parametrów S_{st} i l_{st} – ilość wierzchołków lekko rośnie (coraz więcej mikrowierzchołków) oraz szybko rosnące starcie wierzchołków ziaren. Konkluzja – ściernica ulegała zużyciu ściernemu z ograniczonym samoostrzeniem: zużycie wytrzymałościowe: 40%, zużycie ścierne: 60%.

Ściernica J dla $v_{ft} = 14$ m/min

W tym przypadku odległości między wierzchołkami ($RS_{m(s)}$) lekko rosną w wyniku wykruszeń wierzchołków lub ich wyrwania, co odpowiada zużyciu wytrzymałościowemu. Wysokości wzniesień profilu opisane parametrami R_c i $D_{(z)}^2$ maleją, co oznacza, że wierzchołki były ścierane lub wykruszane. Występuje tu zjawisko samoostrzenia, ale w bardziej ograniczonym stopniu, niż w przypadku dla prędkości posuwu stycznego $v_{ft} = 4$ m/min. Ilość wierzchołków (S_{st}) spada, a ich starcie (l_{st}) powoli rośnie. Konkluzja – zużycie przybierało formę wytrzymałościowego i ściernego: zużycie wytrzymałościowe: 70%, zużycie ścierne: 30%.

Ściernica J dla $v_{ft} = 24$ m/min

Odległości między wierzchołkami rosną ($RS_{m(s)}$), ale bardzo słabo. Zauważalnie natomiast maleje wysokość profilu (R_c , $D^2_{(z)}$). Powoli maleje też ilość wierzchołków (S_{st}), a ich starcie następuje zdecydowanie szybciej (parametr l_{st}). Konkluzja – zużycie wytrzymałościowe wraz z ograniczonym zużyciem ściernym: zużycie wytrzymałościowe: 80%, zużycie ścierne: 20%.

Ściernica M dla $v_{ft} = 4$ m/min

W tych warunkach ściernica nie posiadała dobrych własności skrawnych. Już po krótkim czasie szlifowania (odpowiadającym zaledwie t = 211,4 s i $V_w = 126$ mm³) pojawiły się przypalenia szlifierskie na powierzchni przedmiotu obrabianego. Oznacza to, że ziarna tarły o powierzchnię próbek, a temperatura w strefie szlifowania przekroczyła dopuszczalną. Parametry mikrogeometrii wykazują, że nastąpił znaczny wzrost odległości między wierzchołkami profilu ($RS_{m(s)}$ i S_{st}), ale znacząco spadła wysokość profilu CPS (parametr R_c). Oznacza to, że już na początku pracy ściernica utraciła znaczącą część ziaren (nastąpiło ich wyłupanie), a te, które pozostały w strukturze ściernicy uległy starciu (wzrost parametru l_{st}).

Jednakże w wynikach, dla rozpatrywanych parametrów obróbki, odnotowano istotną rozbieżność. Jak wynika z analizy wykresów, odmienny charakter w relacji do pozostałych, wskazujący na formę zużycia ściernicy, wykazały parametry $R_{a(s)}$, $R_{z(s)}$ oraz $D^2_{(z)}$.



Rys. 4.8.12. Zmiany wartości wybranych parametrów mikrogeometrii CPS dla ściernicy 99A60M7V zarejestrowane dla posuwu stycznego stołu szlifierki $v_{ft} = 4$ m/min oraz dla ściernicy po zabiegu obciągania

Uśrednione wartości tych parametrów charakteryzowały się tendencja wzrostową w domenie czasu pracy ściernicy 99A60M7V. Natomiast szczegółowa analiza pojedynczych powtórzeń wykazała spadek koncentracji rzędnych wzniesień wokół wartości średniej (parametr $D_{(z)}^2$) oraz wysokości profili wg 10. punktów (parametr $R_{z(s)}$). Dla średniego arytmetycznego odchylenia profilu (R_a) można przyjąć, że wartości utrzymywały się stałym przedziale (rys. 4.8.12, D111). Ponieważ parametr ten ma ścisły związek ze zużyciem ściernym [Now1991], można uznać, że ściernica w omawianych warunkach uległa intensywnemu zużyciu ściernemu, ale jednocześnie równie dużemu zużyciu wytrzymałościowemu.

Wynika to z faktu bardzo krótkiego okresu trwałości ściernicy, a tym samym czasu pracy ziaren ściernych. Przy początkowym kontakcie (pierwszy punkt pomiarowy) ściernica pozbyła się osłabionych (w wyniku zabiegu obciągania) ziaren ściernych, a dla pozostałych, które były silnie utrzymywane prze mostki spoiwa, zużycie przybrało formę zużycia ściernego. Oznacza to, że w trakcie badań ściernicy 99A60M7V dla prędkości posuwu stycznego stołu $v_{ft} = 4$ m/min, zachodziło zużycie wytrzymałościowe ograniczone głównie do wstępnie osłabionych ziaren. Potwierdza to analiza wykresów. Pierwsza faza zużycia ściernicy następująca tuż po rozpoczęciu operacji szlifowania ostrą ściernicą (pierwszy i drugi punkt pomiarowy) wykazała wyraźne przyrosty parametrów $R_{a(s)}$, $R_{z(s)}$ i $D^2_{(z)}$. Przyrost ten był na tyle istotny, że ogólny charakter wyznaczonych na dalszym etapie linii trendu dla wartości uśrednionych okazał się progresywny. Druga faza zużycia dla większości odnotowanych powtórzeń wiązała się ze spadkiem omawianych parametrów, co z kolei dowodzi o przejściu ściernicy do ściernej formy zużycia.

Konkluzja – zużycie przybierało formę wytrzymałościowego w pierwszej fazie i ściernego w drugiej: zużycie wytrzymałościowe: 50%, zużycie ścierne: 50%.

Ściernica M dla $v_{ft} = 14$ m/min

W tym przypadku nastąpił lekki wzrost odległości między wzniesieniami profilu ($RS_{m(s)}$) przy jednoczesnym wzroście średniej wysokości profilu (R_c , $D^2_{(z)}$). Wskazuje to na występowanie lokalnych wykruszeń w obrębie wierzchołków ziaren, bez znaczącego ich wyrywania ze struktury ściernicy. Ilość wierzchołków (S_{st}) bardzo słabo zmalała, natomiast wyraźnie wzrósł stopień starcia ziaren (parametr l_{st}). Oznacza to, że ściernica utrzymywała większość ziaren w swojej strukturze, a te ulegały tylko częściowemu wykruszeniu i starciu. Konkluzja – ściernica uległa zużyciu wytrzymałościowemu w postaci częściowego wykruszenia (samoostrzenie wierzchołków): zużycie wytrzymałościowe: 30%, zużycie ścierne: 70%.

<u>Ściernica M dla $v_{ft} = 24$ m/min</u>

Dla tych parametrów nastąpił wzrost odległości między wierzchołkami ($RS_{m(s)}$). Wysokość rzędnych profilu ($D^2_{(z)}$) utrzymywała się na stałym poziomie (z ewentualną lekką tendencją spadkową). Odnotowano, także lekki spadek ilości wierzchołków (S_{st}) i ich duże starcie (l_{st}). Oznacza to, że w omawianym przypadku ściernica gubiła tylko najsłabiej związane ziarna, a te, które pozostały w strukturze narzędzia podlegały znaczącemu starciu. Konkluzja – zużycie ścierne przebiegało z ograniczonym samoostrzeniem: zużycie wytrzymałościowe: 20%, zużycie ścierne: 80%.

Wpływ prędkości posuwu wzdłużnego na zmiany mikrogeometrii CPS

Rozpatrując wpływ prędkości posuwu stycznego stołu szlifierki (v_{ft}), czyli warunki pracy ściernic, na rodzaj i charakter zużycia, można stwierdzić, że wraz ze wzrostem obciążenia ziaren w strefie szlifowania, coraz większy udział miało zużycie wytrzymałościowe kosztem zużycia ściernego.

Wnioski wynikające z analizy zużycia mikrogeometrii CPS

Z analizy wykresów przeprowadzonej dla obu badanych ściernic wynika, że charakter i intensywność zmian w obszarze mikrogeometrii CPS były różne. Dla ściernicy o większej twardości (99A60M7V) zaobserwowano wyraźniejszy wzrost długości odcinków starcia wierzchołków (parametr l_{st}) przy jednoczesnym wzroście wariancji ich rzędnych (parametr $D_{(z)}^2$). Świadczy to o występowaniu zjawiska postępującego tępienia (zużycie ścierne) ściernicy w funkcji czasu jej pracy przy jednoczesnej utracie ziaren słabiej związanych przez spoiwo w strukturze narzędzia. Natomiast dla ściernicy miękkiej (99A60J7V), intensywność zużycia ściernego (wyrażone parametrem l_{st}) była wyraźnie mniejsza, a wariancja wysokości wierzchołków ziaren ($D_{(z)}^2$) wyraźnie spadała w funkcji czasu pracy ściernicy. Oznacza to, że ściernica o twardości nominalnie mniejszej twardości pracowała w warunkach zużycia wytrzymałościowego, charakteryzując się ograniczonym samo-ostrzeniem. Natomiast ściernica twardsza, pracowała w warunkach postępującego tępienia z wyraźnymi momentami samoostrzenia.

Przyczyną zaistnienia powyżej opisanych różnic w typie zużycia dla obu ściernic była rozbieżność w wielkości siły utrzymywania ziaren ściernych przez spoiwo dla obu narzędzi. W przypadku ściernicy 99A60M7V, ziarna były silniej związane ze strukturą narzędzia, co doprowadziło w trakcie badań eksperymentalnych do większego ich starcia i utrzymywania na zbliżonym poziomie wysokości profilu przez prawie cały okres czasu pracy ściernicy.

Wzrost tendencji ściernicy o nominalnie mniejszej twardości (99A60J7V) do samoostrzenia powodował rejestrowanie relatywnie większych chropowatości CPS, szczególnie w warunkach dużego obciążenia ziaren (dla $v_{ft} = 24$ m/min). Z kolei, większe wartości nierówności CPS znalazły odzwierciedlenie w uzyskiwanych chropowatościach powierzchni obrabianej. Podobnie, dłuższy czas pracy poszczególnych ziaren (ściernica 99A60M7V o tendencji do zużycia ściernego), w wyniku ich silniejszego powiązania przez spoiwo ze strukturą ściernicy, znajdował niekorzystne odbicie w stanie naprężeń warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego. Zamiany geometryczne oraz własności fizyko-chemicznych, które wystąpiły wraz z upływem czasu szlifowania w materiale obrabianym omówiono w dalszej części niniejszej pracy (rozdz. 4.8.2, D119).

Zmiany makrogeometrii CPS

Występujące w trakcie badań eksperymentalnych zużycie wytrzymałościowe w skali mikro, wraz z upływem czasu, wywoływało również zmiany w obszarze makrogeometrii CPS. Charakter oraz intensywność opisanych zmian były zależne od rodzaju zużycia ściernicy, głównie od podatności na zużycie wytrzymałościowe oraz od warunków pracy.

Analizując zmiany makrogeometrii czynnej powierzchni ściernicy pod uwagę wzięto zużycie krawędziowe (w szczególności parametr B_{kr}) oraz promieniowe (Δr_s oraz A_{sr}).

Zużycie krawędziowe

W przypadku zużycia krawędziowego rejestrowano zmiany zachodzące od strony natarcia ściernicy (w pobliżu czoła atakującego), czyli w strefie najbardziej obciążonej w trakcie usuwania naddatku obróbkowego. Zmiany wybranych parametrów opisujących zużycie krawędziowe zaprezentowano w postaci wykresów na rysunkach 4.8.13 - 4.8.16 ($\Box 113 - 114$).



Rys. 4.8.13. Zmiany wartości długości czynnej krawędzi ściernicy (B_{kr}) dla rozpatrywanych warunków pracy badanych ścienic

Wszystkie parametry opisujące zużycie krawędziowe zmieniały swoje wartości w funkcji czasu pracy ściernic w kierunku coraz większego zużycia. Jednakże zmiany te charakteryzowały się różną intensywnością, zależną od twardości ściernicy, warunków pracy, a także chwilowych zmian zachodzących w strefie szlifowania (mikrozużycie).

Dla ściernicy miękkiej (99A60J7V) zaobserwowano wyraźnie większe zużycie krawędziowe, wyrażone większym zakresem zmierzonych wartości badanych parametrów (B_{kr} , Δr_{kr} , α_{kr} oraz A_{kr}), niż dla ściernicy o większej twardości (99A60M7V).



Rys. 4.8.14. Zmiany wartości zużycia krawędziowego ściernicy (Δr_{kr}) dla rozpatrywanych warunków pracy badanych ścienic



Rys. 4.8.15. Zmiany wartości kąta zużycia krawędziowego (α_{kr}) dla rozpatrywanych warunków pracy ścienic



Rys. 4.8.16. Zmiany wartości powierzchni zużycia krawędziowego (A_{kr}) dla rozpatrywanych warunków pracy badanych ścienic

Analiza zmian zaokrąglenia krawędzi ściernicy (parametry B_{kr} , Δr_{kr} oraz α_{kr}) wykazała, że w początkowym okresie czasu pracy ściernicy nastąpiło wykruszenie ziaren najbardziej obciążonych i powstało znaczne zaokrąglenie krawędzi natarcia (duże wartości α_{kr}). Następnie, w wyniku rozłożenia obciążenia na kolejne ziarna, leżące wzdłuż tworzącej ściernicy, proces zmiany kształtu następował z mniejszą intensywnością. W wyniku czego, następowało rozszerzenie strefy styku ściernicy z powierzchnią przedmiotu obrabianego (większe wartości parametru B_{kr} , mniejsze α_{kr}).

Zużycie promieniowe

Analiza zużycia promieniowego (parametry Δr_s oraz A_{sr}) wykazała wyraźne zużycie wytrzymałościowe w charakterze pracy obu ściernic (z przewagą bardziej niekorzystnych zmian w przypadku ściernicy o nominalnej twardości J). Ściernica twardsza (99A60M7V) charakteryzowała się wyraźnie wolniejszymi zmianami parametrów opisujących makrogeometrię czynnej powierzchni ściernicy (rys. 4.8.17 – 4.8.18, D115).



Rys. 4.8.17. Zmiany wartości zużycia promieniowego (Δr_s) dla rozpatrywanych warunków pracy ścienic



Rys. 4.8.18. Zmiany wartości powierzchni zużycia promieniowego (A_{sr}) dla rozpatrywanych warunków pracy badanych ścienic

Zużycie całkowite

W celu przeanalizowania zużycia całkowitego ściernic, łączącego zużycie krawędziowe i promieniowe, skorzystano z parametru opisującego całkowitą powierzchnię zużycia ściernicy (parametr A_s – rys. 4.8.19, D116) oraz zużycie objętościowe ściernic (parametr V_s – rys. 4.8.20, D116).

W badaniach założono, że na zużycie ściernicy w skali makro, złożyły się zużycie promieniowe Δr_s oraz zużycie krawędziowe Δr_{kr} , stąd równanie określające zużycie objętościowe ściernicy przyjęło postać:

$$V_{s} = 2 \cdot \pi \cdot b_{(s)} \cdot r_{s} \cdot \Delta r_{s} + \pi \cdot b_{(s)} \cdot (\Delta r_{s})^{2} + \dots$$

$$\dots + \pi \cdot b_{D} \cdot r_{s} \cdot \Delta r_{kr} - \frac{\pi}{2} \cdot b_{D} \cdot (\Delta r_{kr})^{2} \quad [\text{mm}^{3}].$$
(4.8.2)

Na rys. 4.8.20 (\Box 116) przedstawiono otrzymane w badaniach zmiany zużycie objętościowe ściernicy (V_s), natomiast szczegółowe wyznaczenie powyższego równania zamieszczono w załączniku do pracy (rozdz. Z.1.8).



Rys. 4.8.19. Zmiany wartości całkowitej powierzchni zużycia (*A_s*) dla rozpatrywanych warunków pracy ścienic



Rys. 4.8.20. Zmiany wartości zużycia objętościowego (V_s) dla rozpatrywanych warunków pracy ścienic

Analiza wyników badań wyraźnie wykazała, że intensywność zużycia była zależna od warunków pracy ściernic. Im większa była wartość prędkości posuwu stycznego (parametr v_{fi}), tym szybciej następowało zużycie ściernicy. Wynikało to z większej intensywności oddziaływań w układzie *powierzchnia obrabiana – czynna powierzchnia ściernicy*. Takie warunki sprzyjały wykruszeniom ziaren i pękaniu mostków spoiwa.

Ściernica o większej twardości (99A60M7V) wyróżniała się wolniejszym tempem zużycia w skali makrogeometrii. Z przebiegów wykresów wynika, że ściernica ta charakteryzowała się (względem ściernicy 99A60J7V) mniejszymi wartościami długości czynnej krawędzi skrawającej B_{kr} (rys. 4.8.13, \Box 113), co znalazło odzwierciedlenie w mniejszych wartościach pola powierzchni zużycia krawędziowego A_{kr} (rys. 4.8.16, \Box 114), a w konsekwencji, także w wolniejszych przyrostach zużycia objętościowego (parametr V_s).

Powyższe wnioski potwierdzone zostały przez wykresy zmian zużycia promieniowego Δr_s (rys. 4.8.17, D115). Ponadto, opisane tendencje utrzymywały się w całym przedziale rozpatrywanego okresu pracy ściernic, czyli zachowania przez nie zdolności skrawnych spełniających kryterium jakościowe wyników obróbki.

Analiza zmian wskaźników makrozużycia ściernic

W pracach badawczych, jako istotny parametr przebiegu procesu obróbkowego przyjmuje się wskaźnik szlifowania (G) lub jego odwrotność – wskaźnik zużycia (W_G).

$$G = \frac{V_w}{V_s} \left[\frac{mm3}{mm3} = 1 \right], W_G = \frac{1}{G}.$$
 (4.8.3)

Ponieważ zmiany obu parametrów są ściśle ze sobą powiązane, w niniejszej pracy zamieszczono tylko wykresy przedstawiające otrzymane w badaniach przebiegi wskaźnika zużycia w domenie czasu pracy ściernic (rys. 4.8.21, D117).



Rys. 4.8.21. Otrzymane przebiegi uśrednionych wartości wskaźnika zużycia (W_G) dla rozpatrywanych warunków pracy badanych ścienic

Wskaźnik ten, co widać na wykresach, cechuje ograniczona zdolność rozstrzygania o przebiegu procesu, a w tym o postępującym zużyciu narzędzia. Wskaźnik zużycia (W_G) jest funkcją czasu szlifowania i po określonym czasie zbliża się do wartości stałej. Nie tworzy on, jednak sam w sobie charakterystyki zużycia ściernicy, ponieważ nie jest w jednoznaczny sposób uzależniony od parametrów procesu. Parametr G wzrasta, natomiast W_G maleje wraz ze zwiększaniem ubytku materiału obrabianego (V_w), natomiast zużycie ściernicy jest funkcją obciążenia i czasu jego trwania, dlatego do opisu przebiegu zużycia ściernicy autorzy pracy [OP1986] proponują wykorzystanie średniej właściwej szybkości promieniowego zużycia objętościowego ściernicy (Z'_{sr}) :

$$Z_{sr}^{'} = \frac{\pi \cdot d_s \cdot \Delta t_s}{t} \left[\mathrm{mm}^2 \cdot \mathrm{s}^{-1} \right].$$
(4.8.4)

Parametr poddany analizie (rys. 4.8.22, \Box 118) uwzględnia obciążenie, czas jego trwania i średnicę ściernicy. Jednakże z powodu charakterystyki zastosowanego planu badań, w którym przeprowadzono okresowe zabiegi obciągania ściernic, wynikające z potrzeby wyrównania CPS, różnice w rejestrowanych wartościach promienia ściernicy (Δr_s) były znacząco większe od utraty promienia spowodowanej zużyciem wytrzymałościowym. To spowodowało, że analiza parametru Z'_{sr} nie przyniosła oczekiwanych rezultatów. Na jego podstawie można tylko stwierdzić, że szybkość promieniowego zużycia objętościowego ściernicy była wprost proporcjonalna do zastosowanej wartości posuwu stycznego (v_{ft}). Ponadto, zależność ta nie posiada charakteru liniowego, wprost proporcjonalnego do upływu czasu szlifowania.



Rys. 4.8.22. Otrzymane przebiegi uśrednionych wartości średniej właściwej szybkości promieniowego zużycia objętościowego ściernicy (*Z*'_{sr}) dla rozpatrywanych warunków pracy ścienic

Analizując te same prędkości posuwu stycznego stołu szlifierki, szybsze promieniowe zużycie objętościowe ściernicy zarejestrowano dla ściernicy posiadającej tendencję do zużycia wytrzymałościowego (ściernica o twardości J). Świadczy to o większym zużyciu względnym tej ściernicy, co odzwierciedliło się w intensywności zużycia objętościowego V_s (rys. 4.8.20, \Box 116). Zjawisko to wiązało się z szybszą utratą ziaren ściernych poddanych procesom wykruszania i wyrywania w większym tempie, niż w przypadku ściernicy o nominalnie większej twardości (99A60M7V).

Wnioski z analizy zużycia geometrii CPS

Szczegółowa analiza zmian parametrów geometrycznych czynnej powierzchni ściernic w okresie ich trwałości pozwoliła scharakteryzować postępujące zużycie i wyprowadzić poniżej zebrane wnioski:

- Zużycie geometrii narzędzia występowało w skali mikro i makro.
- Intensywne i długotrwałe zużycie mikrogeometrii odzwierciedlało się w zmianach występujących w skali makro.
- Ściernice pracowały z różnymi typami zużycia, które to znajdowały różny udział w całkowitym zużyciu narzędzi.

- Rodzaj oraz intensywność zachodzących zmian zależne były od warunków pracy, zróżnicowanych przez odpowiedni dobór prędkości posuwu stycznego (v_{ft}) stołu szlifierki.
- Ściernica o nominalnie mniejszej twardości (99A60J7V) charakteryzowała się przewagą zużycia wytrzymałościowego przechodzącego w zużycie ściernie na końcu okresu trwałości narzędzia, natomiast czynna powierzchni ściernicy 99A60M7V ulegała głównie zużyciu ściernemu z jednoczesną tendencją do odnowień.
- Zastosowanie większej wartości parametru v_{ft} w trakcie szlifowania, sprzyjało intensywniejszemu udziałowi zużycia wytrzymałościowego kosztem zużycia ściernego.
- Dla dłuższych okresów pracy ściernic, narzędzie o większej nominalnej twardości charakteryzowało się wyraźnie mniejszym zużyciem kształtowym (parametry B_{kr} , Δr_{kr} i α_{kr}).

4.8.2. Analiza zmian warstwy wierzchniej szlifowanych próbek

Stan warstwy wierzchniej materiału kształtowanego w procesie obróbki wiórowej, jest wynikiem mechanicznego i cieplnego oddziaływania narzędzia. Skutki tych oddziaływań powodują odkształcenia plastyczne oraz zmiany w strukturze materiału obrabianego, aby ostatecznie zmienić ogólne własności fizyko-chemiczne warstwy wierzchniej. Ponieważ proces szlifowania może w decydującym stopniu wpłynąć na właściwości eksploatacyjne obrabianych części, a w szczególności znacząco je obniżyć, gdy obróbka realizowana jest zużytą ściernicą, w niniejszej pracy zdecydowano się określić zmiany zachodzące w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego.

W procesie szlifowania powierzchnia przedmiotu poddawana jest działaniu sił oraz wysokich temperatur, więc cechy warstwy wierzchniej są skutkami tych zjawisk. Z pośród cech mierzalnych do określenia na potrzeby niniejszej pracy wybrano:

- strukturę geometryczną powierzchni za pomocą wybranej, reprezentatywnej grupy parametrów profilu chropowatości powierzchni,
- oraz cechy fizyko-chemiczne stref warstwy wierzchniej w postaci naprężeń własnych w skali makronaprężeń (naprężenia pierwszego rodzaju, [Kel1963])¹¹.

Obie grupy parametrów stanowią ważne kryterium oceny jakości obrabianego materiału, a często też pomagają w wyznaczaniu okresu trwałości ściernicy.

Ocena wzrokowa powierzchni próbek

Obserwacja organoleptyczna powierzchni próbek po szlifowaniu pod koniec okresu trwałości ściernicy, dokonana za pomocą zmysłu wzroku wykazała, że powierzchnie te charakteryzują się (nie licząc miejsc z przypaleniami szlifierskimi) istnieniem lustrzanego połysku (rys. 4.8.2a, D101). Jest to zwykle cecha powierzchni polerowanych lub docieranych. Zaobserwowanie tego rodzaju powierzchni w procesie szlifowania wskazuje, że powstały one najprawdopodobniej na skutek szlifowania zalepioną czynną powierzchnią ściernicy. Natomiast, powstałe na końcu badanego okresu trwałości ściernic przypalenia (rys. 4.8.2b, D101), występowały w postaci miejscowych lub na całej powierzchni zmian zabarwienia, spowodowanych tworzeniem się warstwy tlenków.

Badania realizowano w ramach Projektu współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego (75%) oraz środków budżetu państwa (25%) w ramach Zintegrowanego Programu Operacyjnego Rozwoju Regionalnego







¹¹ Badania współfinansowane:

Wpływ czasu szlifowania na mikrogeometrię powierzchni obrobionej

Zmiany mikrogeometryczne powierzchni obrabianych, zarejestrowane w badanym okresie, charakteryzowały się znacznym rozrzutem wartości w lokalnych punktach pomiarowych. Wyznaczone parametry chropowatości powierzchni dla wszystkich powtórzeń ujawniły, że chwilowe zmiany warunków obróbki następujące w strefie szlifowania, a wywołane mikro- i makrozmianami CPS, znacząco wpływały na charakterystykę badanych powierzchni (rys. 4.8.23 - 4.8.26, $\Box 120 - 123$).

W przeciwieństwie do rozpatrzonych wcześniej zmian geometrii CPS (rozdz. 4.8.1), przeprowadzenie analizy uśrednionych wartości parametrów chropowatości szlifowanych powierzchni mogłoby wprowadzić znaczące i jednocześnie niedopuszczalne błędy w interpretacji charakteru występujących zmian. Znacznie pewniejsze wyniki dała interpretacja poszczególnych powtórzeń, gdyż nie wprowadzała ona niepewności analiz, pomimo, że ogólny charakter zmian danego parametru mógł przebiegać w bardzo zbliżonej formie, zarówno dla wartości bezpośrednio zarejestrowanych na profilu, jak i dla ich wartości uśredniających wszystkie powtórzenia.



Rys. 4.8.23. Przebiegi wartości parametrów chropowatości powierzchni szlifowanych ściernicą 99A60J7V w rozpatrywanych okresie i warunkach pracy

(verte •)

Rys. 4.8.23. (ciąg dalszy)





Rys. 4.8.24. Przebiegi wartości parametrów chropowatości powierzchni szlifowanych ściernicą 99A60M7V w rozpatrywanych okresie i warunkach pracy

(verte ♦)

Rys. 4.8.24. (ciąg dalszy)



Rys. 4.8.25. Przebiegi wartości parametrów statystycznych opisujących chropowatość powierzchni szlifowanych ściernicą 99A60J7V w rozpatrywanych okresie i warunkach pracy (verte •)

Rys. 4.8.25. (ciąg dalszy)





Rys. 4.8.26. Przebiegi wartości parametrów statystycznych opisujących chropowatość powierzchni szlifowanych ściernicą 99A60M7V w rozpatrywanych okresie i warunkach pracy (verte •)

Rys. 4.8.26. (ciąg dalszy)



Każdy punkt pomiarowy dla dowolnie wybranego czasu pracy ściernicy, szczególnie w pierwszym okresie jej pracy, często charakteryzował się znaczącym rozrzutem wartości względem średniej, wyraźnie przekraczającym dokładność pomiarową. Dlatego wyniki ujmujące wartości uśrednione wszystkich powtórzeń (zamieszczone w załączniku, rozdz. Z.4.1.1), cechowały się istnieniem dużych odchyleń standardowych. Z tego powodu, analizując zmiany mikrogeometrii powierzchni próbek poprzez ocenę kierunku zmian parametrów chropowatości, zdecydowano się rozpatrywać każde z powtórzeń badań indywidualnie.

Zarejestrowane zmiany (oddzielnie dla każdej z badanych ściernic), reprezentujące ogólne tendencje charakteryzujące wybrane parametry w funkcji czasu prac ściernic w rozpatrywanych warunkach badań zamieszczono w tab. 4.8.5 (D125) oraz tab. 4.8.6 (D126). Analiza tendencji i zakresu zmian poszczególnych parametrów w funkcji czasu szlifowania, pozwoliła na określenie poniżej opisanych zmian.

Próbki szlifowanie ściernicą 99A60J7V

 $R_{a(w)}$ – wyraźna tendencja malejąca wartości w funkcji czasu pracy ściernicy, odwrotnie proporcjonalna do zastosowanej wartości posuwu wzdłużnego (v_{fi}). Największą tendencję malejącą odnotowano dla najniższej zastosowanej wartości posuwu. Analizując przebiegi chropowatości wyrażone średnim arytmetycznym odchyleniem rzędnych profilu $(R_{a(w)})$, znajdującym najczęstsze zastosowanie w pracach badawczych i kontroli technicznej wyrobów, stwierdzono, że w początkowym okresie czasu, decydujący wpływ na otrzymywaną chropowatość powierzchni szlifowanej miał zabieg obciągania ściernic. Ziarna słabiej utrzymywane w strukturze ściernicy, ulegały wykruszeniom, a tym samym rosła średnia wysokość chropowatości powierzchni ściernicy (wstępne zużycie wytrzymałościowe). Duża ilość ostrych krawędzi skrawających powodowała bardzo szybki spadek chropowatości powierzchni szlifowanej. Drugi okres przebiegu parametru $R_{a(w)}$ charakteryzował się ogólnym zmniejszeniem chropowatości na skutek tępienia się ziaren oraz zalepiania przestrzeni międzyziarnowych ściernicy.

	T1-250x32x98-99A60J7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC,									
	$v_s = 27,5$	$[m/s], a_e = 0$	0,03 [mm],	$f_a = 0,3 \text{ [mm/skok]}, Q_c = 3 \times 10^{-3} \text{ [m^3min^{-1}]}$						
	$v_{ft} = 4 \text{ [m/min]}$		$v_{ft} = 14 \text{ [m/min]}$			$v_{ft} = 24 [m/min]$				
	pow. 1	pow. 2	pow. 3	pow. 1	pow. 2	pow. 3	pow. 1	pow. 2	pow. 3	
$R_{a(w)}$	\ 4	▶5	3	\ 4	\searrow_1	2	∖3	3	2	
RS _{m(w)}	2,2	2,2	2,1	5,4	5,4	5,4	2,3	2,3	2,3	
Δq	•4	•4	4	3	2,2	\searrow_1	\searrow_1	$\mathbf{\lambda}_0$	\searrow_1	
r _{ws}	3,2	3,2	3,2	4,3	4,3	4,3	2,1	2,1	2,1	
$L_{ heta}$	3	3	3	2	2	2	2	\searrow_2	2	
Rmr ₂₀	2,2,3	\ 4	2	4	3	3	4,3	3,2	3,2	
T_Z	≠ 2	≠3	/ 1	≠3	2,3	/ 2	≠3	≠ 2	≠ 1	
Wz	2	1,0	\searrow_1	\searrow_1	2,2	1,1	$\mathbf{\lambda}_1$	$\mathbf{\lambda}_1$	\ 1	
QN_Z	12	X 2	12	2,2	2,2	1,2	12	1,1	2,2	

 Tab. 4.8.5.
 Ogólne tendencje zmian parametrów chropowatości próbek dla ściernicy 99A60J7V w funkcji jej czasu pracy w analizowanych warunkach badań

 $RS_{m(w)}$ – w przypadku tego parametru, zaobserwowano dwa etapy: pierwszy charakteryzował się wyraźnym wzrostem wartości, po czym następował powolny spadek wartości. Zachowanie parametru określającego średni odstęp miejscowych wzniesień profilu wyraźnie potwierdza zmienny charakter zużycia ściernicy, który odzwierciedlił się w chropowatości przedmiotów obrabianych. Ściernica ulegała wstępnie zużyciu wytrzymałościowemu (stąd zaobserwowany wzrost wartości odległości między wzniesieniami), aby przejść do zużycia o charakterze ściernym w późniejszym okresie jej pracy.

 Δq – wyraźny spadek wartości pochylenia profilu chropowatości w funkcji czasu pracy ściernicy występował tylko w początkowym okresie. Oznacza to, że profile chropowatości powierzchni próbek zmniejszały swoje pochylenie (nierówność). Stopień tej utraty był odwrotnie proporcjonalny do zastosowanej wartości posuwu wzdłużnego (v_{ft}).

 r_{sw} – wyniki analizy wartości promienia zaokrąglenia wierzchołków profilu są porównywalne z parametrem $RS_{m(w)}$, gdyż zaobserwowano dwa etapy: pierwszy to wyraźny wzrost, drugi to powolny spadek wartości. Oznacza to, że powierzchnia powstała w wyniku oddziaływania ściernicy, której ziarna na początku podlegały łupaniu i wykruszaniu (ostre krawędzie dawały szersze ślady poobróbkowe i stąd wzrost ich zaokrąglenia krzywizn), a następnie w wyniku coraz większego zużycia ściernego następowało tarcie, przez co powierzchnia miała coraz mniejsze ślady poobróbkowe (o mniejszych promieniach krzywizn).

 L_0 – w badaniach zaobserwowano wyraźny spadek wartości względnej długości profilu w funkcji czasu pracy ściernicy. Oznacza to, że systematycznie spadała rzeczywista długość profilu (tzw. rozwinięty profil), co równoważne jest z postępującym zmniejszaniem się wysokości nierówności powierzchni i mniejszym stopniem rozwinięcia zarysu.

 Rmr_{20} – wartości udziału nośnego profilu uległy wyraźnej regresji w funkcji czasu pracy ściernicy. Oznacza to, że spadała suma szerokości wierzchołków profilu powierzchni próbek na analizowanej głębokości, co równoważne jest z oddziaływaniem na badane powierzchnie ściernicy o wyraźnym zużyciu wytrzymałościowym. Otrzymane powierzchnie charakteryzują się małą liczbą wysokich wzniesień. Szybkość spadku parametru Rmr_{20} była odwrotnie proporcjonalna do zastosowanej wartości posuwu wzdłużnego (v_{ft}).

 T_z , W_z i QN_z – w przypadku analizy udziałów stref chropowatości w krzywej geometrycznej styku (SCGC), można przypuszczać, że nastąpił lekki wzrost udziału strefy wierzchołkowej (T_z) kosztem strefy roboczej (W_z) i quasi nominalnej. Takie zmiany sugerują, że ściernica pracowała z niewielką przewagą zużycia wytrzymałościowego, a warunki przebiegu procesu odzwierciedliły się w kształcie profilu chropowatości powierzchni obrabianej, na który nałożył się profil ściernicy. Można także sądzić, że w kształtowaniu profilu przedmiotu większy udział brały procesy mikroskrawania i bruzdowania ziarnem, niż procesy tarcia.

Próbki szlifowanie ściernica 99A60M7V

Ze względu na niekorzystne warunki pracy ściernicy o twardości M przy prędkości posuwu $v_{ft} = 4$ m/min, analizę wyników pomiarów przeprowadzono w dwóch osobnych grupach.

	T1-250x32x98-99A60M7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27.5 \text{ [m/s]}, a_e = 0.03 \text{ [mm]}, f_a = 0.3 \text{ [mm/skok]}, O_c = 3 \times 10^{-3} \text{ [m^3min^{-1}]}$								
	$v_{ft} = 4 \text{ [m/min]}$			$v_{ft} = 14 \text{ [m/min]}$			$v_{fi} = 24 \text{ [m/min]}$		
	pow. 1	pow. 2	pow. 3	pow. 1	pow. 2	pow. 3	pow. 1	pow. 2	pow. 3
$R_{a(w)}$	\ 4	▶4	\searrow_4	▶3	3	3	▶5	▶5	▶5
RS _{m(w)}	10	X 0	∕0	\ 1	\ 1	•3	\ 4	\ 4	\ 4
Δq	2	\ 1	2	X 0	▶0	▶0	2	2	\ 1
r _{ws}	$\mathbf{\lambda}_0$	\ 0	$\mathbf{\lambda}_{0}$	2,2	▲3	2	2,2	≠ 1	2,2
$L_{ heta}$	\ 4	•4	4	3	3	3	\ 4	\ 4	\ 4
Rmr ₂₀	3,2	≠ 2	A 1,1	\searrow_1	▶3	2	\ 4	▲3	\ 4
T_Z	▲3	2	2	12	2,2	12	13	12	13
Wz	1	12	≠ 1	3,2	12	▲3	3	\ 1	2
QNz	2,2	2	A 1,1	2,2	12	13	13	1	12

Tab. 4.8.6.Ogólne tendencje zmian parametrów chropowatości próbek dla ściernicy 99A60M7V
w funkcji jej czasu pracy w analizowanych warunkach badań

Próbki szlifowanie ściernicą o twardości M z posuwem v_{ft}=4 m/min

 $R_{a(w)}$ – wyraźny spadek średniej arytmetycznej odchylenia rzędnych profilu w funkcji czasu pracy ściernicy. Podobnie jak dla ściernicy o twardości J, zaobserwowano bardzo szybki spadek chropowatości powierzchni szlifowanej, szczególnie porównując pierwsze dwa punkty pomiarowe. Drugi okres przebiegu parametru $R_{a(w)}$ (dla udziału głównie ściernej formy zużycia ściernicy) charakteryzował się łagodniejszym spadkiem chropowatości.

 $RS_{m(w)}$ – w tym przypadku można wyróżnić dwa etapy zmian średniego odstępu miejscowych wzniesień profilu: pierwszy charakteryzujący się lekkim spadkiem wartości oraz drugi o powolnym wzroście wartości. Zachowanie tego parametru wyraźnie potwierdza ścierny charakter zużycia ściernicy, która w tych warunkach ulegała głównie tej formie zużycia. Zaobserwowany wzrost spadku odległości między wzniesieniami profilu wynikał z długiego utrzymywania przez ściernicę ziaren ściernych w swojej strukturze. W wyniku oddziaływania CPS, powstały powierzchnie o znacznie mniejszych wysokościach wzniesień (w stosunku do powierzchni pierwotnej), ale z ich większą ilością. Po pewnym czasie, starcie ziaren powodowało, że odległości między wzniesieniami wzrosły, a powierzchnia stała się jeszcze mniej rozwinięta.

 Δq –zaobserwowano spadek wartości pochylenia profilu chropowatości w funkcji czasu pracy ściernicy. Oznacza to, że profile chropowatości powierzchni próbek zmniejszały stopniowo swoje pochylenie (czyli nierówność).

 r_{sw} – można wyróżnić delikatny spadek wartości. W wyniku coraz większego zużycia ściernego następowało tarcie ziaren, przez co powierzchnia, dla kolejnych punktów pomiarowych, charakteryzowała się śladami obróbkowymi o coraz mniejszych promieniach krzywizn.

 L_0 – w badaniach zaobserwowano bardzo szybki spadek wartości względnej długości profilu w funkcji czasu pracy ściernicy. Oznacza to, że po bardzo krótkim okresie czasu prac ściernicy spadała rzeczywista długość profilu (rozwinięty profil) powierzchni przedmiotu obrabianego, co równoważne jest ze ścięciem (przez ziarna ściernicy) wysokich wzniesień profilu i dodatkowym ich wygładzeniem z powodu dużego starcia samych ziaren oraz wzrostu intensywności zjawiska bruzdowania.

 Rmr_{20} – w przypadku wartości udziału nośnego profilu zaobserwowano dwa etapy: pierwszy charakteryzował się wyraźnym wzrostem wartości parametru, po czym następował trochę wolniejszy spadek wartości. Wzrost w funkcji czasu pracy ściernicy oznacza, że wzrosła suma szerokości wierzchołków profilu powierzchni próbek na analizowanej głębokości, co równoważne jest z oddziaływaniem na tą powierzchnię ściernicy pracującej ze zużyciem ściernym. Otrzymane powierzchnie charakteryzowały się występowaniem szerokich wzniesień profilu chropowatości.

 T_z , W_z i QN_z – w przypadku analizy udziałów stref chropowatości dla krzywej geometrycznej styku (SCGC), można przypuszczać, że nastąpił wzrost udziału strefy roboczej (W_z) kosztem strefy wierzchołkowej (T_z) i częściowo quasi nominalnej, oznacza to, że ściernica pracowała z niewielką przewagą zużycia ściernego. Można sądzić też, że w kształtowaniu profilu przedmiotu większy udział brały procesy tarcia, niż mikroskrawania i bruzdowania ziarnem.

Próbki szlifowanie ściernicą o twardości M dla pozostałych wartości posuwu

 $R_{a(w)}$ – wyraźna tendencja malejąca średniej arytmetycznej odchylenia rzędnych profilu w funkcji czasu pracy ściernicy była proporcjonalna do zastosowanej wartości posuwu wzdłużnego (v_{ft}). Największe pochylenie przebiegu wartości parametru można było zaobserwować dla największej zastosowanej wartości posuwu. Podobnie jak w poprzednio omówionych przypadkach, zaobserwowano bardzo szybki spadek chropowatości powierzchni szlifowanej w pierwszym okresie czasu pracy ściernicy. Dalej przebiegi parametru $R_{a(w)}$ charakteryzowały się łagodniejszym spadkiem chropowatości. Oznacza to, że w wyniku zmieniającej się topografii CPS otrzymywano powierzchnie o coraz mniejszej chropowatości. Świadczy to o ściernym charakterze zużycia narzędzia.

 $RS_{m(w)}$ – w przypadku analizy średniego odstępu miejscowych wzniesień profilu, podobnie jak w przypadku parametru $R_{a(w)}$, zaobserwowano dość wyraźną tendencja malejącą w funkcji czasu pracy ściernicy. Była ona proporcjonalna do zastosowanej wartości posuwu wzdłużnego (v_{ft}). Świadczy to o typowo ściernym charakterze zużycia ściernicy.

 Δq – w tym przypadku, także zaobserwowano spadek wartości pochylenia profilu chropowatości w funkcji czasu pracy ściernicy. Oznacza to, że profile chropowatości powierzchni próbek zmniejszały stopniowo swoją nierówność. Stopień nachylenia krzywej był odwrotnie proporcjonalny do zastosowanej wartości posuwu wzdłużnego (v_{ft}).

 r_{sw} – podobnie jak dla posuwu v_{ft} = 4 m/min, w pozostałych przypadkach także można wnioskować o spadku wartości w funkcji czasu pracy ściernicy. W wyniku coraz większego zużycia ściernego następowało tarcie ziaren, przez co powierzchnie charakteryzowały się śladami obróbkowymi o coraz mniejszych promieniach krzywizn.

 L_0 – podobnie jak w przypadku ściernicy o nominalnej twardości J, zaobserwowano wyraźny spadek wartości względnej długości profilu w funkcji czasu pracy ściernicy. Oznacza to, że systematycznie spadała rzeczywista długość rozwiniętego profil, co równoważne jest z postępującym zmniejszaniem się wysokości nierówności powierzchni. Porównując tempo spadku tego parametru dla obu ściernic, zauważono, że chropowatość znacznie szybciej malała w przypadku ściernicy o nominalnie większej twardości (99A60M7V), co wiązało się to z przewagą ściernego charakteru jej zużycia.

 Rmr_{20} – podobnie jak dla ściernicy 99A60J7V, tu także zaobserwowano wyraźny spadek wartości udziału nośnego profilu w funkcji czasu. Oznacza to, że spadała suma szerokości wierzchołków profilu powierzchni próbek na analizowanej głębokości, co może być równoznaczne z oddziaływaniem na tą powierzchnię ściernicy zarówno o zużyciu wytrzymałościowym, jak i ściernym. Otrzymane powierzchnie charakteryzują się małą ilością wysokich wzniesień. Szybkość spadku parametru Rmr_{20} była proporcjonalna do zastosowanej wartości posuwu wzdłużnego (v_{fi}).

 T_z , W_z i QN_z – w przypadku analizy udziałów stref chropowatości w krzywej geometrycznej styku (SCGC), można przypuszczać, że dla tych parametrów szlifowania nastąpił delikatny wzrost udziału strefy wierzchołkowej (T_z), głównie kosztem strefy roboczej (W_z), natomiast strefa quasi nominalna (QN_z) charakteryzowała się niewielkim wzrostem wartości w funkcji czasu pracy ściernicy. Oznacza to, że ściernica pracowała z przewagą zużycia ściernego z tendencjami do gwałtownych samo-odnowień CPS. Tak jak poprzednio, zmiany profilu CPS odbiły się to na profilu przedmiotu po szlifowaniu. Można sądzić, że w kształtowaniu profilu przedmiotu największy udział brały procesy bruzdowania ziarnem, w mniejszym stopniu procesy tarcia. Proces mikroskrawania brał przewagę nad pozostałymi formami oddziaływania ziarna ściernego zachodzącymi w przypadku twardej ściernicy gwałtownie, co pewien okres.

Wpływ parametrów obróbki na chropowatości próbek

Przeprowadzone do tej pory analizy wpływu zmian geometrii CPS oraz chropowatości powierzchni obrobionej wykazały, że aktualna topografia ściernicy oraz wydajność objętościowa szlifowania (parametr Q_w), będąca wynikiem przyjętych wartości nastawnych procesu (głównie prędkości posuw stycznego stołu v_{ft}), posiadały zasadniczy wpływ na rezultaty obróbki. Przy stałej wydajności Q_w (czyli stałym v_{ft}), parametry czynnej powierzchni ściernicy, a wraz z nią chropowatości przedmiotów szlifowanych, zmieniały się w czasie pracy. Zaobserwowano zmniejszanie się chropowatości powierzchni obrabianej w kolejno szlifowanych próbkach.

Z analizy wpływu wydajności objętościowej szlifowania (bez uwzględnia zmian czynnej powierzchni ściernicy), wynika, że większe wartości Q_w są przyczyną ogólnego wzrostu parametrów chropowatości. Ponadto, wszystkie czynniki, które wpływały na zmniejszenie chropowatości profili CPS (tj. niższa wydajność objętościowa szlifowania i dłuższy czas pracy ściernicy) powodowały równocześnie zmniejszenie chropowatości przedmiotu. Zmniejszanie się chropowatości powierzchni próbek wynikało z postępującego procesu zużycia ściernicy.

Zmiany mikrogeometrii powierzchni przedmiotów szlifowanych w funkcji parametrów zużycia ściernicy

Zmiany zachodzące na powierzchni przedmiotów obrabianych w skutek postępującego zużycia CPS są często istotne i nie można ich ominąć w analizach, szczególnie w przypadku wytwarzania części o powierzchniach współpracujących, gdzie oprócz tolerancji geometrycznych ważne jest zachowanie, także odpowiedniej jakości powierzchni opisanej w postaci parametrów chropowatości.

Tab. 4.8.7. Zmiany średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości powierzchni próbek $(R_{a(w)})$ w funkcji czynnej szerokości ściernicy (B_{kr}) oraz starcia względnego wzniesień profilu (l_{st})



Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Z tego względu w niniejszym podrozdziale opisano wyniki badań odnoszących się do próby oceny jakościowej i ilościowej związków zachodzących pomiędzy zmierzonymi parametrami geometrycznymi CPS (B_{kr} , l_{st}) oraz otrzymywanymi wartościami wskaźnika zdolności skrawnej ściernic (K_{CPS}), a wybranymi parametrami mikrogeometrii powierzchni obrabianych. Wszystkie parametry były oceniane po zakończeniu procesu szlifowania dla kolejnych punktów pomiarowych.

Analizę zmian parametrów opisujących mikrogeometrię powierzchni obrabianych w funkcji zużycia ściernicy przeprowadzono w oparciu o interpretację cech wysokościowych (arbitralnie wybrano parametr R_a) oraz wzdłużnych (wybrano parametr RS_m) profilu chropowatości. Cechy te odniesiono do zmian zachodzących w CPS, zarówno w skali makro (parametr B_{kr}), jak i w skali mikro (parametr l_{st}). Wybrane wyniki analizy w postaci wykresów oraz podstawowych równań regresji przedstawiono poniżej, pozostałe wyniki zamieszczono w załączniku do pracy (rozdz. Z.4.1.2).

Badania wykazały istnienie ścisłego związku zachodzącego pomiędzy otrzymanymi w trakcie szlifowania zmianami geometrycznymi CPS, a cechami wysokościowymi powierzchni obrabianych, wyrażonymi poprzez parametr $R_{a(w)}$.

Uzyskane relacje charakteryzują się względnie wysoką jakością dopasowania wyznaczonych modeli do danych eksperymentalnych, o czym świadczą wysokie wartości współczynników determinacji oraz korelacji. Potwierdzeniem powyższego rozpoznania są wyższe od krytycznej wartości testów istotności *Fishera-Snedecora* dla otrzymanych modeli, a także wysokie wartości testu *t-Studenta* dla poszczególnych współczynników równań. Oznacza to, że otrzymane w badaniach zależności mogą z powodzeniem być zastosowane w celu przewidywania chropowatości przedmiotu szlifowanego (w postaci parametru $R_{a(w)}$) na podstawie znajomości geometrycznych zmian CPS. Jednakże, modele te mogą być wykorzystane tylko do ograniczonego obszaru, wyznaczonego przez odpowiedni dobór parametrów i warunków obróbki, który określono dla przeprowadzonych doświadczeń.

Bezwzględne wartości standaryzowanych współczynników świadczą o większym udziale parametru B_{kr} (czynna szerokość ściernicy) w kształtowaniu się wartości $R_{a(w)}$. Oznacza to, że największe znaczenie w kształtowaniu mikrogeometrii powierzchni próbek posiadały zmiany geometryczne CPS zachodzące w skali makro. Ponadto, wpływ ten jest odwrotnie proporcjonalny, co oznacza, że postępujące zużycie ściernicy, wyrażone w postaci przyrostów czynnej szerokości ściernicy (B_{kr}), może powodować zmniejszanie chropowatości powierzchni szlifowanych. W przypadku zmiennej niezależnej opisującej względne starcie wzniesień profilu (parametr l_{st}), oddziaływanie na wyniki obróbki nie było już tak jednoznaczne. W zależności od warunków szlifowania (twardość ściernicy oraz prędkość posuwu stycznego stołu szlifierki v_{ft}), starcie wierzchołków ziaren mogło spowodować różny kierunek zmian parametru $R_{a(w)}$.

Natomiast w przypadku oceny zmian średniego odstępu miejscowych wzniesień profilu chropowatości ($RS_{m(w)}$) próbek jednocześnie w funkcji czynnej szerokości ściernicy (B_{kr}) oraz starcia względnego wzniesień profilu (l_{st}), nie odnotowano jednoznacznych związków pomiędzy tymi zmiennymi. Istotne statystycznie równania regresji wielorakiej udało się wyznaczyć jedynie dla danych eksperymentalny otrzymanych dla obróbki z prędkością posuwu stycznego stołu szlifierki $v_{ft} = 24$ m/min (załącznik, rozdz. Z.4.1.2). Uznając otrzymane relacje za dostatecznie wiarygodne, obie zmienne charakteryzowały się odwrotnie proporcjonalnym oddziaływaniem na średni odstęp miejscowych wzniesień profilu chropowatości ($RS_{m(w)}$). Wyniki analiz wskazują, także na większy udział starcia względnego wzniesień profilu (l_{st}) w kształtowaniu parametru $RS_{m(w)}$. Co oznacza, że starcie ziaren ściernicy mogło mieć znaczący wpływ na kształtowanie się wzdłużnych parametrów profili powierzchni szlifowanych.



Tab. 4.8.8. Zmiany średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości powierzchni próbek $(R_{a(w)})$ w funkcji zmian geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej ściernicy (K_{CPS})

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności α = 0,05.

Parametr określający średnią arytmetyczną rzędnych profilu chropowatości powierzchni próbek ($R_{a(w)}$) w funkcji zmian geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej ściernicy (K_{CPS}) charakteryzował się względnie słabą jakością dopasowania modeli do danych, o czym świadczą w większości przypadków niskie wartości współczynnika korelacji.

Jednakże zależności pomiędzy rozpatrywanymi czynników wyjściowych procesu posiadały stabilny, jednoznaczny charakter. Nie licząc lokalnych zmian, parametr $R_{a(w)}$ wyraźnie malał wraz ze spadkiem zdolności skrawnej ściernic, określonej wskaźnikiem K_{CPS} . Świadczą o tym kierunki linii trendu dla poszczególnych powtórzeń przedstawione na wykresach, jak i zawsze dostatnie wartości współczynników w otrzymanych równaniach regresji. Oznacza to, że wraz ze wzrostem stopnia zużycia ściernicy, wyrażonym spadkiem zdolności skrawnej (K_{CPS}), należy oczekiwać zmniejszenia się chropowatości powierzchni przedmiotów szlifowanych, a przynajmniej parametru $R_{a(w)}$. Nie należy jednak, otrzymanych równań regresji traktować jako wiążących, ani stosować ich, jako ilościowo dokładnych wyznaczników średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości powierzchni szlifowanych próbek ($R_{a(w)}$).

Przebiegi przedstawione na powyższych wykresach wskazują na spadek parametru $R_{a(w)}$ w funkcji utraty zdolności skrawnej, natomiast średni odstęp wzniesień profilu ($RS_{m(w)}$) wykazał praktycznie całkowity brak korelacji z rozpatrywanym wskaźnikiem K_{CPS} . Jedynym przypadkiem, dla którego udało się określić istotne statystycznie relacje było szlifowanie w warunkach o największej dynamice, czyli dla największej prędkości $v_{ft} = 24$ m/min. Jednakże, z powodu braku wystąpienia pomiędzy zmiennymi korelacji w pozostałych przypadkach, należy uznać te wyniki za przypadkowe.

Charakter i kierunek zmian zmiennej $RS_{m(w)}$ w funkcji K_{CPS} był silnie zależny od parametrów obróbki, w tym głównie od wartości prędkości posuwu stycznego stołu szlifierki (v_{fl}), przez co wykazał wszystkie możliwe tendencje (zarówno rosnące, malejące jak i oscylujące w przybliżeniu stałej wartości). Oznacza to, że znajomość wskaźnika K_{CPS} może jedynie sugerować o chropowatości próbek, jaką otrzyma się po zakończeniu procesu, ale w żadnym wypadku o niej nie rozstrzyga.

Zmiany naprężeń w warstwie wierzchniej

Na poniższych wykresach (rys. 4.8.27, \Box 133) przedstawiono wyniki pomiarów naprężeń własnych w skali makronaprężeń (naprężenia pierwszego rodzaju) w warstwie wierzchniej przedmiotów obrabianych analizowanymi ściernicami, pracującymi przy prędkościach posuwu stołu szlifierki $v_{ft} = \{14, 24\}$ m/min. Wartości naprężeń oraz ich głębokości zalegania w warstwie wierzchniej materiału szlifowanego oszacowano za pomocą metody metodę *Waissmana-Phillipsa*, wykorzystując do tego celu wzory zamieszczone w pracy [PliS1986]:

$$\sigma_{(i)} = \frac{\Delta f_{w(i)}}{\Delta h_{w(i)}} \cdot K_{\sigma} \cdot h_{w(i)}^2 - \sum_{j=1}^{i-1} \sigma_{(j)} \frac{4 \cdot \Delta h_{w(j)}}{h_{w(j)}} \text{ [MPa = MN/m^2]}, \tag{4.8.5}$$

$$h_{w(i)} = h_{w(0)} - \sum_{i=1}^{i-1} \Delta h_{w(i)} \quad [\mu m],$$
(4.8.6)

$$K_{\sigma} = \frac{E}{3 \cdot l_{tr} \cdot (l_{tr} - 2 \cdot l_a)} \text{ [MPa/mm2]}, \qquad (4.8.7)$$

gdzie:

 $\sigma_{\max(i)}$ – naprężenia dla *i*-tej trawionej warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego,

- $\Delta f_{w(i)}$ przyrost strzałki ugięcia po usunięciu *i*-tej strefy warstwy wierzchniej,
- $\Delta h_{w(i)}$ grubość usuniętej strefy warstwy wierzchniej,
- K_{σ} stała materiałowa,

 $h_{w(i)}$ – grubość próbki przed usunięciem *i*-tej strefy,

- $h_{w(0)}$ początkowa grubość próbki (przed rozpoczęciem procesu trawienia),
- l_{tr} długość odcinaka trawionego,
- *l_a* długość ramienia pomocniczego w układzie pomiaru strzałki ugięcia,
- E moduł Younga, dla badanego materiału $E = 2,11 \times 10^5$ [MPa].

Ponieważ w procesie zastosowano stałe wartości wielkości nastawnych szlifowania (z wyjątkiem posuwu v_{ft}), które to mają znaczący wpływ na temperaturę przedmiotu i jej gradient podczas chłodzenia, uzyskano zbliżone przebiegi naprężeń szczątkowych. Zgodnie z informacjami podanymi w literaturze (np. [OP1986]), w przypadku zastosowania ściernic elektrokorundowych, w niniejszych badaniach nie udało się uniknąć rozciągających naprężeń szczątkowych (+ σ). Im bliżej rdzenia materiału (dalej od powierzchni warstwy wierzchniej) zaobserwowano mniejsze wartości naprężeń. Ponadto, dla większych wydajności objętościowych szlifowania (Q_w), stwierdzono większe wartości naprężeń rozciągających.



Rys. 4.8.27. Naprężenia własne pierwszego rodzaju w warstwie wierzchniej szlifowanych powierzchni w funkcji okresu trwałości badanych ściernic

Charakterystyczna cecha występująca przy szlifowaniu ściernicami elektrokorundowymi, ogólnie polegająca na znaczącym wzroście liczby ziaren skrawających (wywołane wzrostem parametru B_{kr}), znalazła swoje odzwierciedlenie w większej ilości ciepła doprowadzanego do przedmiotu obrabianego. Przy zachowaniu stałych parametrów obróbki, omawiane zjawisko odzwierciedliło się we wzroście naprężeń rozciągających (+ σ).

Szczegółową analizę oddziaływania ciepła powstającego w strefie szlifowania na charakter gromadzonych w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego naprężeń przedstawiono w załączniku (rozdz. Z.4.1.3).

Ze wzrostem wartości posuwu stycznego stołu (v_{ft}), naprężenia zwiększały swoje wartości, oznacza to, że musiała ulec wzrostowi także temperatura materiału. Czas kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym zmalał przy zwiększeniu posuwu, czyli do zwiększenia naprężeń musiała doprowadzić znacząco większa temperatura. Oznacza to, że w badaniach mieliśmy do czynienia z procesem szlifowania o wykładniku potęgowym f > 0,57, a materiał należał do łatwo szlifowalnych w danym układzie *przedmiot - ściernica* (wniosek na podstawie informacji zawartej w pracy [OP1986]). W przypadku szlifowania płaszczyzn, zwiększenie prędkości przedmiotu (v_{ft}) przy zachowaniu stałych parametrów a_e i v_s , powoduje zwiększenie wydajności objętościowej obróbki oraz zwiększenie temperatury dla materiałów łatwo szlifowalnych. Powyższe założenia zostały potwierdzone przez obliczenia i analizy przeprowadzone na podstawie otrzymanych wyników badań właściwych.

Wydzielająca się w trakcie procesu znacząca ilość ciepła, posiadała bezpośredni wpływ na rodzaj naprężeń szczątkowych. Zaobserwowane naprężenia w warstwie wierzchniej analizowanych próbek, które były szlifowane ściernicami wykonanymi z ziaren elektrokorundu i spoiwa ceramicznego, określono jako niekorzystne z faktu, że (pomijając strefy przypowierzchniowe do głębokości około 25 μ m) były to naprężenia rozciągające (+ σ).

Wpływ czasu szlifowania na wielkość naprężeń w warstwie wierzchniej

W trakcie długotrwałego procesu szlifowania, wraz z postępującym zużyciem wytrzymałościowym i ściernym ziaren ściernicy (co wykazały wyniki badań i ich analiza zamieszczona w poprzednim rozdziale), następowały zmiany składowych siły w strefie szlifowania. Składowe te można opisać poniższymi zależnościami [PliJ1988.2, PliS1988]:

$$F_{n} = \frac{B_{kr} \cdot l_{g}}{\left(RS_{m}\right)^{2}} \left[\frac{c_{1}}{\left(l_{w}\right)_{a}} \left(\sqrt{\frac{v_{ft} \cdot \left(a_{e}\right)^{1/2} \cdot \left(RS_{m}\right)^{2}}{v_{s} \cdot K_{(\varepsilon,r)} \cdot tg(\varepsilon) \cdot \left(d_{s}\right)^{1/2}}} \right)^{n} - c_{2} \cdot \left(l_{st}\right)^{m} \right], \qquad (4.8.8)$$

$$F_{c} = \mu \cdot \frac{B_{kr} \cdot l_{g}}{\left(RS_{m}\right)^{2}} \left[\frac{c_{1}}{\left(l_{w}\right)_{a}} \left(\sqrt{\frac{v_{fl} \cdot \left(a_{e}\right)^{1/2} \cdot \left(RS_{m}\right)^{2}}{v_{s} \cdot K_{(\varepsilon,r)} \cdot tg(\varepsilon) \cdot \left(d_{s}\right)^{1/2}}} \right)^{n} - c_{2} \cdot \left(l_{st}\right)^{m} \right],$$

$$(4.8.9)$$

gdzie:

 c_1 – stała zależna od szerokości ziarna,

 c_2 – stała zależna od warunków szlifowania,

 $(l_w)_a$ – względna długość wierzchołków falistości obwodu ściernicy,

 $K(\varepsilon,r)$ – współczynnik kształtu ziarna (dla ziarna elektrokorundowego $K(\varepsilon,r) = 1,2$, [PliS1986]),

- połowa kąta wierzchołkowego ziarna (dla ziarna elektrokorundowego $\varepsilon = 60^{\circ}$, [PliS1986]),

r – promień wierzchołka ziarna,

μ – współczynnik proporcjonalności (współczynnik tarcia zależny od właściwości szlifowanego materiału i prędkości obwodowej ściernicy v_s).

Ponieważ badania zużycia ściernicy zrealizowano przy stałych parametrach obróbki, to wartości składowych siły szlifowania zależały od cech geometrycznych CPS, czyli od chwilowego kształtu i rozkładu wierzchołków ziaren ściernych. W analizowanych badaniach, wartości składowych siły szlifowania w głównej mierze zależały od średniej odległości wierzchołków ziaren ($RS_{m(s)}$), średniej długości starcia wierzchołków (l_{st}), długości krawędzi skrawającej ściernicy (B_{kr}). Wszystkie wymienione parametry charakteryzują się zmiennością w funkcji czasu pracy ściernicy w wyniku jej postępującego zużycia wytrzymałościowego i ściernego, co opisano w rozdziale 4.8.1. Szczegółową analizę zależności występujących pomiędzy zużyciem narzędzia, opisanym wybranymi geometrycznymi parametrami zużycia CPS (B_{kr} , l_{st} oraz K_{CPS}), a maksymalnymi wartościami naprężeń kumulowanych w warstwie wierzchniej przedmiotów obrabianych (σ_{max}) opisano w dalszej części niniejszego rozdziału.

Zwiększenie starcia ziaren ściernych, czyli postępujące zużycie ścierne oraz wzrost pola strefy szlifowania (wyrażonej parametrami B_{kr} i l_g), spowodowały zwiększenie siły w strefie szlifowania, a tym samym doprowadziły do coraz większego tarcia ziaren ściernych o powierzchnię obrabianą. Zwiększenie składowych siły szlifowania było jednoznaczne ze zwiększeniem energii skrawania ziarnem, co można zapisać w postaci równania [KPP1978]:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} [c_1 \cdot a_e + c_2 \cdot l_{st}(t)] \cdot v_s \cdot \frac{l_g}{\pi \cdot d_s} dt .$$
(4.8.10)

Oznacza to, że energia tarcia ziaren wzrastała wraz z długością starcia ziaren oraz głębokością szlifowania. Ponieważ energia prawie całkowicie zamieniona została w ciepło wnikające w materiał obrabiany, to zmiany gradientu temperatury wywołane zużyciem ściernicy posiadały istotny wpływ na zmiany fizyko-chemiczne warstwy wierzchniej.



Rys. 4.8.28. Maksymalne naprężenia w warstwie wierzchniej powierzchni szlifowanych (σ_{max}) i głębokości ich zalegania ($h_{\sigma max}$) dla ściernicy o twardości J dla prędkości posuw stycznego $v_{fi} = 4$ i 24 m/min w funkcji czasu zużycia ściernicy

Badając rozkład wartości naprężeń skumulowanych w warstwie wierzchniej przedmiotów poddanych obróbce w funkcji czasu pracy ściernicy, stwierdzono jednoznacznie, że zarejestrowane najwyższe wartości (σ_{max}) dla kolejnych punktów pomiarowych przybierały coraz to wyższe wartości. Równocześnie przesuwały się też wartości $h_{\sigma max}$ (zalegania najwyższych wartości naprężeń) w kierunku coraz większych głębokości. Zjawisko to dotyczyło zarówno ściernicy o nominalnie mniejszej twardości 99A60J7V, jak i ściernicy twardszej 9960M7V (rys. 4.8.28, D135 oraz 4.8.29, D135).



Rys. 4.8.29. Maksymalne naprężenia w warstwie wierzchniej powierzchni szlifowanych (σ_{max}) i głębokości ich zalegania ($h_{\sigma max}$) dla ściernicy o twardości M dla prędkości posuw stycznego $v_{ft} = 4$ i 24 m/min w funkcji czasu zużycia ściernicy

Przy czym, głębokość warstw występowania maksymalnych wartości naprężeń w warstwie wierzchniej szlifowanych próbek, zmieniająca się w funkcji zużycia CPS, zawsze była nie mniejsza, niż w początkowym okresie pracy ściernicy (tuż po zabiegu obciągania).

Porównując bezpośrednio ściernice o różnej twardości, znacząco większe wartości maksymalnych naprężeń zaobserwowano dla ściernicy o nominalnie większej twardości (99A60M7V). Analizując natomiast wpływ prędkości posuwu stycznego stołu v_{ft} (który w przeprowadzonych badaniach decydował o zmianie wydajności objętościowej szlifowania Q_w), odnotowano, że dla większych jego wartości, rozkład naprężeń charakteryzował się naprężeniami zalegających na mniejszych głębokościach, szczególnie w przypadku ściernicy o nominalnie mniejszej twardości (99A60J7V).

Większe wydajności charakteryzowały się mniejszymi głębokościami, na których rejestrowano zmiany strzałek ugięcia dla kolejnych punktów pomiarowych wyznaczonych przez czas szlifowania.

Korelacja naprężeń własnymi warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego z postępującym zużyciem ściernic

Otrzymane w badaniach eksperymentalnych relacje zachodzące pomiędzy wyznaczonymi naprężeniami warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego (σ_{max}), a wybranymi parametrami opisującymi czynną powierzchnię ściernic zaprezentowano w tab. 4.8.9 (\Box 136). W skład wybranych parametrów makro- i mikrogeometrii CPS weszły wielkości B_{kr} oraz l_{st} , ponadto uwzględniono zmiany wskaźnika zdolności skrawnej K_{CPS} (tab. 4.8.10, \Box 138).

Wyniki badań wykazały, że o wartościach rozciągających naprężeń własnych ($+\sigma_{max}$) w warstwie wierzchniej szlifowanego przedmiotu można wnioskować jedynie łącząc analizę zmian parametrów geometrycznych CPS w skali makro (B_{kr}) oraz w skali mikro (l_{st}). Wszystkie rozpatrywane ściernice wykazały istnienie wysokiej korelacji pomiędzy stanem czynnej powierzchni ściernicy, a dokładnie jej postępującym zużyciem, a wynikami obróbki w postaci maksymalnych wartości rozciągających naprężeń własnych zalegających w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego.



Tab. 4.8.9. Zmiany wartości naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego (σ_{max}) w funkcji czynnej szerokości ściernicy (B_{kr}) oraz starcia względnego wzniesień profilu (l_{st})

(verte ♦)

1 ad. 4.8.9. (<i>ciqg</i>	dalszy)
----------------------------	---------



Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności α = 0,05.

W początkowych warunkach pracy ściernic, które charakteryzowały się przewagą udziału ostrych wierzchołków ziaren ściernych na CPS, wielkość powierzchni kontaktu z przedmiotem przy stałych parametrach obróbki była niewielka i zależna głownie od zmian parametru B_{kr} . W opisanych warunkach natężenie strumienia cieplnego oddziaływującego na przedmiot obrabiany było niskie, a sprawność odprowadzania ciepła ze strefy obróbki znacząco większa w porównaniu do kolejnych faz zużycia narzędzia, a przede wszystkim w odniesieniu do końcowego momentu, gdy ściernica utraciła zdolność skrawną i pojawiły się przypalenia szlifierskie na powierzchni przedmiotu obrabianego.

W badaniach uzyskano bardzo wysokie współczynniki korelacji i determinacji (R^2), co świadczy o dobrym dopasowaniu linii regresji do danych doświadczalnych. Obliczone wartości statystyki *t-Studenta* w większości przekraczają wartość krytyczną. Oznacza to, że wybrane wyrazy wolne oraz współczynniki kierunkowe są istotne statystycznie dla wyznaczonej zależności pomiędzy naprężeniami, a rozpatrywanymi parametrami CPS.



Tab. 4.8.10. Zmiany wartości naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego (σ_{max}) w funkcji wskaźnika zdolności skrawnej czynnej powierzchni ściernicy (K_{CPS})

(verte •)

Powyższe wnioski potwierdzone zostały spełnieniem testu F ($F > F_{kr}$), co oznacza, że estymowane równania regresji są statystycznie adekwatne do danych. Standaryzowane wartości współczynników (kolumna *st. współ.*) wykazały, że na wartość maksymalnych naprężeń rozciągających wyraźnie silniejsze oddziaływanie miała szerokość ściernicy (B_{kr}).

Należy przy tym zauważyć, że w przypadku ściernicy o nominalnie wyższej twardości (99A60M7V), dla posuwu stycznego stołu $v_{ft} = 4$ m/min, przyczyną powstawania większych naprężeń może być wzrost odcinka starcia wierzchołków ziaren, nawet przy niewielkim wzroście czynnej szerokości ściernicy.





Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności α = 0,05.

Reasumując, wyniki badań wykazały, że istnieje wysoka korelacja zachodząca pomiędzy geometrycznymi własnościami CPS, a wartościami naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotów szlifowanych. Ponadto, istnieją uzasadnione przesłanki, że wyznaczone zależności można wykorzystać do ilościowego wyznaczenia naprężeń (przynajmniej dla rozpatrzonego zakresu).

Analiza statystyczna wyników eksperymentów wykazała, także istnienie bardzo wysokich współczynników korelacji i determinacji (R^2) pomiędzy zarejestrowanymi naprężeniami rozciągającymi, a wskaźnikiem zdolności skrawnej (tab. 4.8.10, D138). Świadczy to o dobrym dopasowaniu linii regresji do danych doświadczalnych. Potwierdza to spełnienie testu *Fishera-Snedecora* ($F > F_{kr}$), co oznacza, że estymowane równania regresji są statystycznie adekwatne do danych. Z drugiej jednak strony, obliczone wartości statystyki *t-Studenta* są mniejsze od wartości krytycznej, co oznacza, że wybrane wyrazy wolne oraz współczynniki kierunkowe nie są istotne statystycznie.

Powyższe wnioski sugerują, że istnienie wysoka korelacja zachodząca pomiędzy rejestrowanymi naprężeniami rozciągającymi w warstwie wierzchniej przedmiotów obrabianych, a zużyciem czynnej powierzchni ściernicy (wyrażonym w postaci wskaźnika zdolności skrawnej). Jednakże nie można wnioskować o ilościowej wielkości tych naprężeń na podstawie, tylko i wyłącznie, znajomości wartości wskaźnika K_{CPS} .

Wnioski ze zmian zachodzących w warstwie wierzchniej próbek

Zmiany mikrogeometryczne powierzchni obrabianych, zarejestrowane w funkcji czasu pracy ściernicy, charakteryzowały się znacznym rozrzutem wartości dla lokalnych punków pomiarowych. Wyznaczone parametry chropowatości powierzchni dla wszystkich powtórzeń ujawniły, że chwilowe zmiany warunków obróbki następujące w strefie szlifowania, a wywołane mikro- i makrozmianami CPS, znacząco wpływały na rezultaty obróbki, czyli charakterystykę badanych powierzchni.

Z analizy wpływu wydajności objętościowej szlifowania (bez uwzględnia zmian czynnej powierzchni ściernicy), wynika, że większe wartości Q_w są przyczyną ogólnego wzrostu parametrów chropowatości. Natomiast wraz ze wzrostem v_{ft} , zaobserwowano mniejszą intensywność spadku wysokości i nierówności profili. Zmniejszanie się chropowatości powierzchni próbek wynikało z postępującego procesu zużycia ściernicy. Ponadto, analiza zmian parametrów mikrogeometrycznych powierzchni szlifowanych potwierdziła różny charakter zużycia rozpatrywanych ściernic w przyjętych warunkach badań. Zmiany poszczególnych parametrów profilu chropowatości potwierdziły, że ściernica o nominalnie mniejszej twardości (99A60J7V) pracowała z dominacją zużycia wytrzymałościowego. Natomiast wyniki otrzymane dla ściernicy twardej (99A60M7V) świadczą o typowo ściernym charakterze jej zużycia z tendencjami do gwałtownych samoodnowień.

Wszystkie czynniki, które wpływały na zmniejszenie chropowatości profili CPS (tj. niższa wydajność objętościowa szlifowania i dłuższy czas pracy ściernicy) powodowały równocześnie zmniejszenie chropowatości przedmiotu.

Badania wykazały istnienie ścisłego związku zachodzącego pomiędzy otrzymanymi w trakcie szlifowania zmianami geometrycznymi CPS, a cechami wysokościowymi powierzchni obrabianych, wyrażonymi poprzez parametr $R_{a(w)}$. W przypadku oceny zmian średniego odstępu miejscowych wzniesień profilu chropowatości ($RS_{m(w)}$) próbek jednocześnie w funkcji czynnej szerokości ściernicy (B_{kr}) oraz starcia względnego wzniesień profilu (l_{st}), nie odnotowano jednoznacznych związków pomiędzy tymi zmiennymi.

Bezwzględne wartości standaryzowanych współczynników świadczą o większym udziale parametru B_{kr} (czynna szerokość ściernicy) w kształtowaniu się wartości $R_{a(w)}$. Oznacza to, że największe znaczenie w kształtowaniu mikrogeometrii powierzchni próbek posiadały zmiany geometryczne CPS zachodzące w skali makro. Wyniki analiz wykazały, także większy udział starcia względnego wzniesień profilu (l_{st}) w kształtowaniu parametru $RS_{m(w)}$. Co oznacza, że starcie ziaren ściernicy mogło mieć znaczący wpływ na kształtowanie się wzdłużnych parametrów profili powierzchni szlifowanych.

Wybrane parametry mikrogeometrii powierzchni przedmiotów poddanych obróbce szlifowaniem charakteryzowały się niską korelacją (parametr R^2) ze wskaźnikiem zdolności skrawnej ściernic (K_{CPS}). Ponadto, stwierdzono brak wyraźnej i stałej istotności statystycznej w relacji pomiędzy parametrami $R_{a(w)}$ oraz $RS_{m(w)}$, a parametrem K_{CPS} . Średni odstęp wzniesień profilu ($RS_{m(w)}$) wykazał praktycznie całkowity brak korelacji z rozpatrywanym wskaźnikiem K_{CPS} . Jednocześnie wyniki badań mogą sugerować, że wraz ze wzrostem stopnia zużycia ściernicy, wyrażonym spadkiem zdolności skrawnej (K_{CPS}), należy oczekiwać zmniejszenia się chropowatości powierzchni przedmiotów szlifowanych, a przynajmniej parametru $R_{a(w)}$.

Analiza wyników oszacowanych naprężeń, pozwala jednoznacznie stwierdzić, że w trakcie długotrwałego procesu szlifowania należy spodziewać się wzrostu naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego, co związane jest ściśle z postępującym zużyciem narzędzia. Wynika to za faktu wzrostu powierzchni kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym, co powoduje wzrost siły i energii szlifowania, a w konsekwencji także temperatury w strefie obróbki.

W pracy nie uwzględniono skutków kumulacji wpływów cieplnych, wywołanych wielokrotnym szlifowaniem określonego przedmiotu. Przeprowadzono jedynie względnie krótkotrwałe szlifowanie ściernicą o różnym stopniu stępienia. Oznacza to, że otrzymane wyniki nie charakteryzują się tak głęboko zalegającymi naprężeniami, jakie można byłoby otrzymać w przypadku długotrwałego szlifowania jednego przedmiotu. Próbki wykorzystane do osiągnięcia kolejnych etapów zużycia ściernicy nie zostały poddane analizie, ponieważ założono, że celem w niniejszych badaniach jest ustalenie jedynie wpływu zużycia narzędzia na zmiany fizyko-chemiczne warstwy wierzchniej bez wprowadzania dodatkowych czynników, które wpływałyby na otrzymane wyniki.

Wyniki badań wykazały, że o wartościach rozciągających naprężeń własnych ($+\sigma_{max}$) w warstwie wierzchniej szlifowanego przedmiotu można wnioskować jedynie łącząc analizę zmian parametrów geometrycznych CPS w skali makro (B_{kr}) oraz w skali mikro (l_{st}). Ponadto, wszystkie rozpatrywane ściernice wykazały istnienie wysokiej korelacji pomiędzy stanem czynnej powierzchni ściernicy, a dokładnie jej postępującym zużyciem (parametr K_{CPS}), a wynikami obróbki w postaci maksymalnych wartości rozciągających naprężeń własnych zalegających w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego.

Wysoki stopień współzależności naprężeń ze stanem CPS świadczy o tym, że wyznaczone równania można wykorzystać do ilościowego wyznaczenia naprężeń własnych.

Ponieważ składowe siły szlifowania mogą rosnąć w różnych warunkach pracy ściernicy, nie tylko z powodu postępującego tępienia, a także w warunkach samoostrzenia i wzrostu szerokości starcia, to ich wzrost nie zawsze można utożsamiać ze zwiększeniem się wartości naprężeń w warstwie wierzchniej szlifowanego przedmiotu. Podobnie, większa ilość wydzielanego ciepła nie jest równoważna z pojawieniem się większych naprężeń. Istotnym czynnikiem jest powód wzrostu siły szlifowania: wzrost przekroju warstwy skrawanej pojedynczym ziarnem (a_{zsr}), czy zwiększenie ilości ziaren aktywnych (z_c). Zależne jest to od formy zużycia ściernicy podczas jej pracy (indeks górny przy strzałkach wzrostu reprezentuje jego siłę: 1 – lekki wzrost, 2 – silny wzrost wartości) [PP1990]:

- dla postępującego tępienia: $F_c, F_n \uparrow = f(z_c, B_{kr} \uparrow^1, l_g, l_{st} \uparrow^2, a_{zsr} \uparrow^2),$ (4.8.11)
- dla samoostrzenia: $F_c, F_n \uparrow = f(z_c \uparrow^2, B_{kr} \uparrow^2, l_g, l_{st} \uparrow^1, a_{zsr} \uparrow^1).$ (4.8.12)

Oznacza to, że oprócz wartości składowych siły szlifowania, na gromadzenie się naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotów obrabianych, wpływ miało jaką powierzchnię one obciążają. Dlatego w niniejszej pracy zdecydowano się dodatkowo na odniesienie składowych siły szlifowania do powierzchni strefy szlifowania. Opisane w dalszej części niniejszej pracy średnie obciążenia jednostkowe wyżej wymienionymi składowymi (parametry q_{Fc} i q_{Fn}), wykazały korelację z maksymalnymi naprężeniami rozciągającymi zalegającymi w warstwach wierzchnich badanych próbek (rozdz. 4.8.3).

Powyższe wyniki stanowią podstawę do prognozowania własności warstwy wierzchniej przedmiotów szlifowanych poprzez kontrolę zużycia CPS. Jednakże, chcąc uniknąć praco- i czasochłonnych pomiarów parametrów geometrycznych topografii ściernicy, należy dokonać pośredniej oceny stanu zużycia ściernicy poprzez rejestrację i analizę zmian sygnałów wyjściowych procesu szlifowania (F_n , F_c i EA_{RMS}).

4.8.3. Analiza zmian składowych siły i mocy szlifowania

W trakcie badań eksperymentalnych wykonano pomiary składowych siły szlifowania. Za najistotniejsze uznano składową styczną (F_c) oraz składową normalną (F_n) siły szlifowania, których wartości informują o zasadniczych zmianach zachodzących w strefie szlifowania. Wyniki pomiarów w postaci średnich zarejestrowanych wartości w funkcji czasu pracy ściernicy przedstawiono na rysunku 4.8.30 (\Box 142).



Rys. 4.8.30. Zmiany wartości składowej stycznej (F_c) oraz normalnej (F_n) siły szlifowania w funkcji czasu pracy badanych ściernic (okres szybkiego zużycia oznaczono prostokątem)

Otrzymane wyniki badań i ich analiza wskazują na wzrost średniej wartości składowych siły stycznej i normalnej siły szlifowania, który następuje z upływem czasu pracy narzędzia, czyli ilością usuniętej objętości materiału obrabianego. Porównując zmiany dla obu sił, większe wartości odnotowano dla składowej normalnej, co oznacza, że w procesie szlifowania ściernica znacznie silniej oddziałuje w kierunku prostopadłym do powierzchni obrabianej przedmiotu, niż w kierunku zgodnym z posuwem.

Wybrane zmiany proporcji składowej normalnej (F_n) do stycznej (F_c) siły szlifowania dla obu badanych ściernic ujęto w postaci wartości uśrednionych na rysunku 4.8.31 (\Box 143). Wyniki dla pozostałych warunków badań zamieszczono w załączniku (rozdz. Z.4.2).

Porównanie charakteru zmian wartości ilorazu F_n/F_c , zachodzących w funkcji czasu przebiegu procesu szlifowania, jest niekorzystne dla ściernicy o nominalnie większej twardości (99A60M7V). Spowodowane jest to wzrostem siły tarcia w wyniku większego stępienia wierzchołków ziaren. Ponieważ wzrost siły wiązania *ziarno - spoiwo* jest przyczyną dłuższe-

go okresu pracy ziaren do momentu ich wyrwania, to w przypadku ściernicy o większej twardości zaobserwowano względnie większy wzrost składowej normalnej siły szlifowania. Stąd przebiegi ilorazu sił charakteryzują się, w tym przypadku, tendencją wzrostową lub oscylują w stałym zakresie wartości.



Rys. 4.8.31. Zmiany średnich wartości stosunku składowej normalnej (F_n) i stycznej (F_c) siły szlifowania

Odmiennymi przebiegami charakteryzowała się praca ściernicy o nominalnie mniejszej twardości (99A60J7V). Tu zaobserwowano zarówno spadki wartości stosunku składowych sił F_n i F_c , jak i ich wyraźną tendencję wzrastającą (w przypadku posuwu stycznego stołu $v_{fl} = 14$ m/min). W wyniku słabszego utrzymywania ziaren w strukturze ściernicy, wzrost pracy tarcia powodował powstawanie termo-naprężeń, które sprzyjały wykruszaniu ziaren i wspomagały proces samoostrzenia, a to z kolei prowadziło do zwiększenia udziału zużycia typu wytrzymałościowego.

Z analizy przebiegu zmian składowych siły szlifowania wynika, że ściernica o wyższej twardości charakteryzowała się większymi przyrostami wartości lub osiągała te same wartości, co ściernica o mniejszej twardości, w krótszym czasie pracy. Ponadto, na pod-stawie korelacji zachodzących pomiędzy składowymi oraz wcześniej opisanymi zmianami makro- i mikrogeometrii CPS, wnioskować można o różnych przyczynach przyrostów sił obserwowanych w trakcie badań doświadczalnych.

Dla ściernicy o niższej nominalnej twardości (99A60J7V), odnotowano przewagę zużycia wytrzymałościowego. W tym przypadku głównym źródłem wzrostu składowych siły szlifowania (dla tożsamych warunków pracy, ustalonych przez odpowiedni dobór parametrów szlifowania) było szybsze zwiększanie czynnej szerokości ściernicy (B_{kr}), niż w drugim z analizowanych przypadków. Tym samym wzrastało pole strefy szlifowania i ilość ziaren biorących udział w szlifowaniu (lub tylko będących w sprężystym kontakcie z powierzchnią obrabianą). Oznacza to, że zmniejszeniu uległa grubość warstwy skrawanej przypadającej na jedno ziarno. Nie przełożyło się to jednak na wyraźną zmianę obciążenia ziaren w przyjętych warunkach badań (wyrażonym poprzez parametr a_{zsr}), ponieważ w trakcie eksperymentów nie odnotowano wyraźnych zmian odległości między wzniesieniami profilu (RS_m).

Natomiast ściernica o nominalnie wyższej zdolności utrzymywania ziaren w swojej strukturze (99A60M7V), charakteryzowała się przewagą zużycia ściernego. Fakt ten potwierdzają wcześniej opisae wyniki badań zmian geometrii CPS, głównie w postaci znacząco mniejszego starcia krawędzi ściernicy (parametr B_{kr}), a także zmiany wybranych parametrów mikrogeometrii ściernicy w postaci zmniejszającej się wysokości profilu (parametr R_c) i rosnącej wartości średniego starcia wierzchołków (l_{st}), przy jednocześnie bardzo słabo malejącej ilości wierzchołków (S_{st}).

W każdym z rozpatrywanych przypadków, największe (i najszybsze) przyrosty wartości składowych siły szlifowania wystąpiły w początkowym okresie pracy ściernic. Okres ten odpowiada także największym zmianom geometrycznym skutków zużycia narzędzia. Powodem opisywanych zmian, zachodzących na CPS w tym okresie czasu pracy ściernic, była gwałtowna utrata ziaren. Początkowo osadzone w strukturze ściernicy ziarna, silnie utrzymywane przez mostki spoiwa, zostały osłabione w wyniku procesu obciągania. Początkowe oddziaływanie ściernicy na materiał obrabiany skutkowało ich wyrwaniem lub wykruszeniem.

Po tym okresie czasu, który charakteryzował się długością zależną od twardości ściernicy oraz warunków obróbki (wynoszącym w granicach od 50 do 200 sekund nieprzerwanej pracy), jak wykazały badania, następowała zmiana charakteru pracy ściernic. Zasadniczy okres postępującego zużycia, posiadał odmienne cechy w przypadku porównywanych ściernic, a w obrębie jednego narzędzia – także w przypadku różnej dynamiki przebiegu procesu (parametr v_{ft}). Różnice te odzwierciedliły się w przebiegach badanych parametrów wyjściowych procesu, w tym także w zmianach składowych siły szlifowania.

Analiza wyników pomiarów siły szlifowania wykazała, że składowa styczna (F_c) wzrasta, gdy ściernica ulega zużyciu z dominacją wytrzymałościowego charakteru zużycia, co równoznaczne jest z odsłanianiem nowych wierzchołków ziaren (odnowienia CPS). Szczególne odzwierciedlenie ma to w początkowej fazie – intensywnego zużycia wytrzymałościowego. Natomiast siła (F_c) malała, gdy ściernica przechodziła w okres tarcia ziarnami, które już uległy procesowi starcia wierzchołków (rys. 4.8.30, \Box 142). Dla prędkości posuwu stycznego stołu $v_{ft} = 14$ m/min, zarejestrowano najbardziej optymalne warunki pracy dla badanych ściernic. Dla opisywanych warunków, dla ściernicy o nominalnej twardości J, dominowało zużycie wytrzymałościowe w całym okresie utrzymywania zdolności skrawnych na akceptowalnym poziomie. Zauważalny jest jedynie spadek wartości składowej F_c siły szlifowania w ostatniej fazie rozpatrywanego okresu pracy ściernicy.

W przypadku największej z rozpatrywanych prędkości posuwu stycznego stołu (v_{ft} =24 m/min), zarejestrowano bardzo krótki (względem pozostałych), okres pracy ściernicy z wyraźnym wzrostem siły skrawania (załącznik, rozdz. Z.4.2), co równoznaczne jest ze wzrostem wysokości oraz ilości wierzchołków skrawających. W tym okresie (i dla tych warunków), dominowało zużycie wytrzymałościowe ściernicy. Drugi okres, który można wyróżnić, to umiarkowane zużycie ścierno-wytrzymałościowe, które charakteryzuje się lekkim spadkiem siły F_c . W ostatniej fazie, w przypadku ściernicy 99A60J7V, nastąpił gwałtowny wzrost siły skrawającej, wynikający z dynamiki procesu. Ściernica ta, w tym okresie pracy, oddziaływała na powierzchnię próbki startymi wierzchołkami ziaren, które utrzymywane przez spoiwo w strukturze ściernicy, nie wypadały, ale silnie oddziaływały na materiał. Jednakże oddziaływanie to, ze względu na kształt i położenie wierzchołków, miało jedynie charakter sprężysty, a także było przyczyną dużego wzrostu temperatury w strefie kontaktu, objawiającego się pojawieniem przypaleń szlifierskich na powierzchni materiału.

Powyższe wnioski potwierdza analiza składowej normalnej siły szlifowania (F_n), dla której w momencie znaczącej utraty wysokości wierzchołków (bardzo silnie utrzymywanych w strukturze ściernicy) rejestrowano bardzo niskie wartości. Odwrotna sytuacja miał miejsce, gdy ściernica charakteryzowała się mocno rozproszonymi wierzchołkami (odsłoniętymi np. w wyniku zajścia procesu samoostrzenia).

Przeprowadzona dodatkowo analiza statystyczna zarejestrowanych sygnałów siły szlifowania, oparta o wyznaczanie podstawowych parametrów (wariancja, moment centralny 4-go rzędu, kurtoza, skośność), w większości wypadków wykazała brak zauważalnej korelacji
ze zużyciem narzędzia, wynikającym z czasu jego pracy. Jedynie o pewnej prawidłowości można mówić w przypadku analizy wariancji (s^2) sygnału składowej stycznej siły szlifowania (F_c), który to parametr może być potraktowany, jako rejestrator momentów samoistnego od-nowienia się ściernicy (rys. 4.8.32, D145).



Rys. 4.8.32. Zmiany wariancji oraz momentu 4. rzędu sygnału składowej stycznej (F_c) siły szlifowania

Gwałtowne zmiany tego parametru mogą świadczyć o wytrzymałościowym charakterze zużycia ściernicy, natomiast wyraźne spadki wartości wariancji powiązane były ze zużyciem ściernicy. Gwałtowny wzrost wariancji siły F_c wokół wartości średniej sugeruje, że w danych momentach proces przebiegał niestabilnie, a na wartości sił wpływ miały różne czynniki. Źródłem tego mogło być wyrywanie i pękanie ziaren, czyli zjawisko samoostrzenia ściernicy. Rejestrowane przypadki powolnych zmian (wzrostu lub spadku) wariancji F_c , sugerują natomiast względnie stabilne zmiany w strefie kontaktu. Tego typu okresy, świadczą zwykle o ściernym charakterze pracy ściernicy.

Wyniki określające przebiegi zmian parametru statystycznego jakim jest moment centralny 4. rzędu (m_4), potwierdzają, a nawet uwypuklają wyniki i wnioski uzyskane dla wariancji sygnału składowej stycznej siły szlifowania. Szczegółowe wyniki badań, opisanych parametrów dla różnych warunków obróbki, zamieszczono w załączniku do niniejszej pracy (rozdz. Z.4.2).

Korelacje składowych siły szlifowania z parametrami CPS

Parametry służące do opisu geometrii czynnej powierzchni ściernicy (CPS) oraz zmian własności geometryczno-fizycznych warstwy wierzchniej przedmiotu szlifowanego, które opisano w poprzednich rozdziałach, wykazały wyraźną zmienność w funkcji czasu pracy ściernicy, bez względu na zastosowane parametry obróbki. Podobnie, wzrost składowych siły szlifowania wynikał z postępującego zużycia ściernic (zarówno w skali makro-, jak i mikrogeometrycznej). Wskazują na to zaprezentowane i omówione poniżej korelacje występujące pomiędzy czynną szerokością ściernicy (B_{kr}), średnim odcinkiem starcia wierzchołów ziaren (l_{st}), a składowymi siły szlifowania (F_n , F_c), w tym także odniesionymi do jednostkowej powierzchni styku (q_{Fn} , q_{Fc}) w dalszej części pracy.

Tab. 4.8.11. Zależność składowych F_c i F_n siły szlifowania od szerokości czynnej ściernicy (B_{kr}) oraz średniego odcinka starcia wierzchołków zarysu czynnej powierzchni ściernicy (l_{st})



Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Wyniki badań i ich dogłębna analiza wykazały wyraźną korelację zachodzącą pomiędzy rejestrowanymi w trakcie przebiegu procesu wartościami składowych siły szlifowania, a określonymi parametrami marko- oraz mikrozużycia CPS, wyrażonymi parametrami B_{kr} (długość czynna krawędzi ściernicy) oraz l_{st} (starcie wierzchołków).

Wzrost składowych siły szlifowania następował zależnie od formy zużycia, opisanej zmianami wartości parametrów geometrycznych CPS. Ogólnie, średnie wartości składowych siły szlifowania rosły wraz ze zużyciem narzędzia. Różnice w przebiegach zarejestrowanych wartości składowych siły szlifowania, wynikały z różnej intensywności zużycia ściernego i wytrzymałościowego dla badanych ściernic. Zużycie ściernicy o nominalnie większej twardości charakteryzowało się zwiększonym udziałem procesu zużycia ściernego, przez co przyrosty siły szlifowania w głównej mierze były wynikiem wzrostu powierzchni starcia ziaren (parametr l_{st}). Natomiast dla ściernicy o mniejszej nominalnej twardości, wzrosty składowych siły szlifowania były wynikiem głównie zwiększonej intensywności zużycia wytrzymałościowego, co wyrażało się zwiększoną strefą skrawania, czyli większymi wartościami czynnej szerokości ściernicy (parametr B_{kr}). Jednakże, ponieważ otrzymane zależności pomiędzy wartościami składowych F_c i F_n siły szlifowania, a szerokością czynną ściernicy (B_{kr}) oraz średnim odcinkiem starcia wierzchołków zarysu czynnej powierzchni ściernicy (l_{st}) nie charakteryzowały się wysoką korelacją i nie reprezentowałyby danych z dostatecznie dużą dokładnościa, nie wykonano dla nich dopasowania i wykreślenia wykresów powierzchniowych.

Uwzględniając standaryzowane wartości współczynników (kolumna *st. współ.*), można wywnioskować o większym oddziaływaniu parametru B_{kr} na kształtowanie się wartości składowych siły szlifowania. Oznacza to, że nieznacznie większy wpływ na otrzymane wyniki miały zmiany w skali makrozużycia CPS. Dopiero przy ich wyhamowaniu, zauważalny stał się wpływ zmian mikrogeometrycznych na kształtowanie wartości składowych siły szlifowania.



Tab. 4.8.12. Rejestrowane wartości składowej stycznej siły szlifowania (F_c) w funkcji geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej ściernicy (K_{CPS})

(verte ♦)

Wyniki badań wykazały, także istnienie bliżej nieokreślonej zależności pomiędzy rejestrowanymi składowymi siły, a wskaźnikiem zdolności skrawnej. Wykresy zgromadzone w tab. 4.8.12 (D147) przedstawiają wyraźną tendencję wzrostu wartości sił wraz z upływem czasu szlifowania i stopniową utratę zdolności skrawnej ściernic. Składowe siły szlifowania rosną wraz ze wzrostem pola strefy szlifowania ($B_{kr} \times l_g$), co wynika ze zwiększenia ilości ziaren skrawających (pomimo zmniejszenia się grubości warstwy skrawanej pojedynczym ziarnem). Jednakże, szczegółowa analiza otrzymanych korelacji wykazała brak wysokiego dopasowania otrzymanych modeli do danych (wartości R), co potwierdzone jest istnieniem nieznaczących statystycznie współczynników regresji w większości przypadków. Ich statystyczny brak istotności potwierdzono porównując wartości testu *Fishera-Snedecora* z wartością krytyczną w oparciu o tab. 15.4 oraz 15.6 w pracy [Kuk2002]. Świadczą o tym, także wartości *poziomu-p*, które są mniejsze od przyjętej wartości poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

T1-250x32x9	8-99A60J7V-4	42m/s,			T1-250x32x9	8-99A60M7	V-42m/s,		
NC10 (60±2)	HRC, $v_s = 27$,	$5 \text{ [m/s]}, a_e = 0$),03 [mm],		NC10 (60 \pm 2) HRC, v_s = 27,5 [m/s], a_e = 0,03 [mm],				
$f_a = 0,3 \text{ [mm/]}$	skok], $Q_c = 3 \times$	10 ⁻³ [m ³ min ⁻¹]			$f_a = 0.3 [\text{mm}//\text{mm}/\text{mm}/\text{mm}//\text{mm}/\text{mm}/\text$	skok], $Q_c = 3$	×10 ⁻³ [m ³ min	·1]	
				- 1/	[m/min]	-	_		
			V_{ft} –	- 14	[111/11111]				
$F_{c(l)} = 25,36-22$	$26,62 \cdot K_{CPS(1)}$ -442	$(K_{CPS(l)})^2$			$F_{c(l)} = 14,6+82$	$1,5 \cdot K_{CPS(l)}$ -1843	$55,8 \cdot (K_{CPS(1)})^2$		
	współ.	t ₍₁₁₎	poziom p			współ.	t ₍₁₃₎	poziom p	
w. wolny	25,36	4,839398	0,000519		w. wolny	14,6	2,90807	0,012217	
$K_{CPS(1)}$	-226,62	-0,416440	0,685098		$K_{CPS(1)}$	821,5	1,66848	0,119113	
$(K_{CPS(l)})^2$	-4423,91	-0,440177	0,668333		$(K_{CPS(l)})^2$	-18455,8	-2,08473	0,057380	
$F_{c(2)} = 22,87+9$	6,83· <i>K</i> _{CPS(2)} -616	$6,35 \cdot (K_{CPS(2)})^2$			$F_{c(2)} = 15,3+85$	9,7·K _{CPS(2)} -222	$16, 6 \cdot (K_{CPS(2)})^2$		
	współ.	t ₍₁₁₎	poziom p			współ.	t ₍₁₃₎	poziom p	
w. wolny	22,87	10,27057	0,000001		w. wolny	15,3	2,25102	0,042328	
$K_{CPS(2)}$	96,83	0,40637	0,692263		$K_{CPS(2)}$	859,7	0,99759	0,336685	
$(K_{CPS(2)})^2$	-6166,35	-1,51652	0,157587		$(K_{CPS(2)})^2$	-22216,6	-1,04706	0,314148	
$F_{c(3)} = 20,3+31$	$9,7 \cdot K_{CPS(3)}$ -1669	$4,3 \cdot (K_{CPS(3)})^2$		_	$F_{c(3)} = 9,9+121$	9,8·K _{CPS(3)} -235.	$32,4\cdot(K_{CPS(3)})^2$		
	współ.	t ₍₁₁₎	poziom p			współ.	t ₍₁₃₎	poziom p	
w. wolny	20,3	3,123124	0,009696		w. wolny	9,9	2,26611	0,041163	
$K_{CPS(3)}$	319,7	0,394967	0,700418		$K_{CPS(3)}$	1219,8	2,91922	0,011958	
$(K_{CPS(3)})^2$	-16694,3	-0,892633	0,391163		$(K_{CPS(3)})^2$	-23532,4	-3,25702	0,006243	
	E.	Г	F			<i>P</i>	<i>P</i>		
	$F_{c(1)}$:	$F_{c(2)}$:	$F_{c(3)}$:			$F_{c(1)}$:	$F_{c(2)}$:	$F_{c(3)}$:	
D	$\int (\mathbf{A}_{CPS(1)})$	$J(\Lambda_{CPS(2)})$	$J(\Lambda_{CPS(3)})$		D	$J(\mathbf{A}_{CPS(1)})$	$J(\mathbf{A}_{CPS(2)})$	$J(\mathbf{A}_{CPS(3)})$	
R^2	0,755255	0,65348	0,339692		R P ²	0.384460	0,280933	0,090181	
R^2	0,340000	0,03340	0.162662		R P ²	0.280761	0.062769	0,4/0330	
K skor.	6 472134	10.37180	2 262701		K skor.	4.050826	-0,002708	5.012878	
r _(2,11)	0,472134	0.00204	2,202/01		r'(2,13)	4,039820	0,537047	0.014020	
	0,013809	0,00294	0,130200		þ	0,042074	0,363960	0,014920	
$\begin{array}{l} F_{kr(2,11)} &= 3.98 \\ t_{kr(0,05;11)} &= 2.20 \end{array}$	8 010				$\begin{array}{l} F_{kr(2,13)} &= 3,72 \\ t_{kr(0,05;13)} &= 2,16 \end{array}$	4 504			

Tab. 4.8.12. (*ciąg dalszy*)

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Oznacza to, że w wielu analizowanych przypadkach istnieją przesłanki do odrzucenia hipotezy o istotności wyznaczonej zależności, co równoznaczne jest z koniecznością przyjęcia hipotezy alternatywnej, która mówi o braku statystycznego związku pomiędzy rejestrowanymi wartościami składnych siły szlifowania, a geometrycznym zużyciem narzędzia.

Powyższe wyniki stanowią bardzo wyraźnie, że siły w procesie szlifowania, w swojej czystej formie, bez odniesienia do innych wielkości wyjściowych procesu, nie oddają jednoznaczności w ocenie okresu trwałości narzędzia ze względu na trudność interpretacji wyników przy tak niskiej zgodności parametrów analizy statystycznej.

Analiza obciążenia jednostkowego strefy kontaktu składowymi siły szlifowania

Zmiany wartości F_n i F_c nie zawsze wykazują wystarczająco dobre korelacje z pogarszającą się zdolnością skrawną ściernic. Oznacza to, że interpretowanie zmian ich

wartości nie pozwala na otrzymanie pełnej informacji o zjawiskach zachodzących w strefie szlifowania. Wynika to z faktu, że taki sam wzrost wartości składowych siły szlifowania może być spowodowany pracą w warunkach samoostrzenia, jak i w warunkach postępującego ostrzenia przy różnej wielkości powierzchni strefy szlifowania.

Wzrost wartości składowych siły szlifowania wraz z upływem czasu pracy ściernicy jest ściśle powiązany z degradacją zdolności skrawnych ściernic wynikających ze zużycia ich CPS w skali makro- i mikrogeometrycznej. Istnienie ścisłej korelacji pomiędzy zasadniczymi parametrami opisującymi geometrię czynnej powierzchni ściernicy (czynna szerokość ściernicy oraz średni odcinek starcia wierzchołków ziaren ściernych), a składowymi siły szlifowania (głównie F_c i F_n) przedstawiono we wcześniejszej części pracy, a także szeroko omówiono w wielu pracach, m.in. [PliS1986, PliJ1988.2, PliS1988] i [PP1990]. W opracowaniach tych wykazano, że wielkość i rodzaj zmian w geometrii narzędzia przekładały się na intensywność oddziaływania mechanicznego i cieplnego przypadającego na jednostkową powierzchnię styku ściernicy z przedmiotem obrabianym ($B_{kr} \times l_g$).

Badania przeprowadzone w ramach niniejszej pracy potwierdziły, że zużycie ściernicy jest przyczyną wzrostu siły szlifowania. Jej składowe rosły wraz ze wzrostem pola strefy szlifowania, co było wynikiem zwiększania się ilości ziaren będących w czynnym kontakcie z powierzchnią przedmiotu obrabianego. Wzrost składowych F_c i F_n siły szlifowania następował również wraz z postępującym starciem wierzchołków ziaren ściernych [PliJ1988.2, PliS1988]. Ponieważ znajomość zmian wielkości składowych siły szlifowania nie stanowi pełnej informacji potrzebnej do dokonania oceny oddziaływania zużycia ściernicy na czynniki wyjściowe procesu (w tym na własności fizyczne warstwy wierzchniej szlifowanych przedmiotów), w niniejszej pracy dokonano analizy obciążenia jednostkowego warstwy wierzchniej w strefie szlifowania, wyrażonego wskaźnikami [PliS1986]:

$$q_{Fn} = \frac{F_{n(t)}}{B_{kr} \cdot l_g} \left[\frac{N}{mm^2} \right], \tag{4.8.13}$$

$$q_{Fc} = \frac{F_{c(t)}}{B_{kr} \cdot l_g} \left[\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2} \right].$$
(4.8.14)

Zrealizowane badania wykazały, że zmieniające się w funkcji czasu pracy ściernicy wartości współczynników q_{Fn} i q_{Fc} stanowią mirę intensywności oddziaływania ściernicy na przedmiot obrabiany, pozwalając na wnioskowanie o rzeczywistych (odniesionych do wielkości powierzchni, na którą oddziałują) siłach działających w strefie szlifowania.

Dla każdej z badanych ściernic i w różnych warunkach ich pracy zarejestrowano różne wartości omawianych wskaźników (rys. 4.8.33, 150).

Analiza przebiegu opisywanych wskaźników w domenie czasu potwierdziła, że intensywność i rodzaj zmian zachodzących w strefie szlifowania, a z tym związany charakter i tempo zużycia ściernicy, zależy od intensywności oddziaływania mechanicznego i cieplnego przypadającego na jednostkową powierzchnię strefy szlifowania.

Zmiany wskaźnika obciążenia jednostkowego powierzchni kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym składową normalną (q_{Fn}) oraz składową styczną (q_{Fc}) siły szlifowania, charakteryzują się wyraźnym postępowo-wykładniczym ($y = ax^b e^{cx}$) spadkiem wartości w funkcji czasu szlifowania. Przebieg ich zmienności można podzielić na 2 etapy. Pierwszy wyróżnia się szybkim spadkiem obciążenia w początkowej fazie pracy ściernic, natomiast drugi etap, to znacznie wolniejsza degradacja wartości, które asymptotycznie dążą

do wartości ściśle zależnej od warunków pracy ściernicy (dla rozpatrywanych parametrów wartość ta mieści się w przedziale $0.5 - 5 \text{ N/mm}^2$).



Rys. 4.8.33. Rejestrowane wartości wskaźników obciążenia jednostkowego warstwy wierzchniej składową styczną (q_{Fc}) oraz normalną (q_{Fn}) siły szlifowania w funkcji czasu pracy ściernic

Ponadto, w pierwszej fazie pracy ściernic, wyróżnić można chwilowy wzrost wartości wskaźników (dla pierwszych punktów pomiarowych). Dla tych punktów, względny przyrost powierzchni kontaktu jest jeszcze niewielki (co jest jednoznaczne z utrzymywaniem ziaren w strukturze ściernicy), więc dana objętość materiału została usunięta mniejszą ilością wierzchołków ziaren, ale za to charakteryzującymi się dużą ostrością (wysokością). Dlatego też, siła nacisku na powierzchnię (składowa normalna) była większa w początkowej fazie obróbki.

Udział obu faz jest zależny od prędkości posuwu stycznego stołu (v_{ft}). Im większa wartość prędkości v_{ft} , tym krótszy etap pierwszy, co oznacza względnie szybszy spadek wartości obciążenia (wyrażonego przez wskaźniki q_{Fn} i q_{Fc}), co można uznać za intensywniejszą utratę zdolności skrawnej. W trakcie nieprzerwanej pracy ściernic, w miarę postępującego tępienia, CPS posiadała coraz mniej ostrych krawędzi na wierzchołkach ziaren, co przekładało się na spadek średnich wartości nacisków na powierzchnię szlifowaną (q_{Fn}). Także poziom rejestrowanego obciążenia wyraźnie zależał od prędkości posuwu v_{ft} . Dla wyższych wartości tego parametru, obciążenie składowymi siły szlifowania przybierało większe wartości w całym analizowanym okresie czasu pracy ściernic.

Odmienny charakter przebiegu wskaźników q_{Fn} oraz q_{Fc} , zarejestrowano dla największej analizowanej prędkości posuwu stycznego stołu w przypadku ściernicy o nominalnie mniejszej twardości oraz dla najmniejszej wartości parametru v_{ft} w przypadku ściernicy o większej nominalnej twardości. W przypadku ściernicy 99A60M7V (przy $v_{ft} = 4$ m/min) nastąpiło nawet odwrócenie kierunku zmian wskaźników obciążenia jednostkowego powierzchni kontaktu. W tych warunkach ściernica niemal natychmiast utraciła zdolność skrawną, uległa starciu i powodowała wystąpienie tzw. przypaleń szlifierskich. Dla tego przypadku wartości q_{Fn} i q_{Fc} utrzymują się na przybliżonym poziomie w całym rozpatrywanym okresie czasu pracy ściernic. Wykresy reprezentujące te szczególne przypadki zamieszczono w załączniku (rozdz. Z.4.2.2).

Przeprowadzona analiza wskazuje także na możliwość określenia, w oparciu o zmiany wskaźników q_{Fn} oraz q_{Fc} , cech pracy ściernic, a tym samym charakteru jej zużycia. W trakcie szlifowania z przewagą zużycia wytrzymałościowego ściernicy, rejestrowano spadek wartości q_{Fn} , a w przypadku zużycia ściernego, charakterystycznego szczególnie w końcowej fazie zużycia ściernic elektrokorundowych, wskaźnik spadał powoli lub utrzymywał się w określonej zmienności.

Wyniki analizy porównawczej wskaźników q_{Fc} i q_{Fn} , wskazują na wysokie podobieństwo przebiegu tych parametrów. Istotne różnice, to zakres obserwowanych wartości oraz odmienne wartości granic, do których dążą oba wskaźniki. Ponadto, wskaźnik q_{Fc} wydaje się bardziej jednoznacznie opisywać zjawiska zachodzące w strefie szlifowania (przy odniesieniu jego wartości do wyników pomiaru makro- i mikrogeometrii CPS). Wniosek ten wynika z faktu większej powtarzalności zarejestrowanych lokalnych punktów pomiarowych (ich mniejsze rozproszenie) w porównaniu do wskaźnika q_{Fn} .

Spadek wartości siły stycznej (F_c) w funkcji czasu pacy ściernic, wynikał ze zwiększenia ogólnej ilości wierzchołków skrawających w strefie szlifowania, poprzez wykruszanie słabszych ziaren i powstanie mikrowierzchołków oraz poprzez zwiększenie udziału powierzchni kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym ($B_{kr} \times l_g$). W wyniku zaistnienia powyższych czynników, siła potrzebna na usunięcie warstwy materiału uległa rozkładowi na większą liczbę ziaren (wierzchołków), przez co zaobserwowano mniejsze wartości wskaźnika obciążenia składową styczną siły szlifowania (q_{Fc}). Natomiast silne, lokalne wzrosty wartości parametru q_{Fc} w początkowej fazie pracy ściernicy, wynikały z zaistnienia procesów samoostrzenia ściernicy, które powodując względne zmniejszenie wierzchołków na CPS, przekładały się na chwilowy wzrost obserwowanej wartości wskaźnika q_{Fc} (mniejsza ilość ostrzy musiała wykonać operację skrawania).

Punkty charakterystyczne odnotowane w przypadku przebiegu wskaźnika zdolności skrawnej (K_{CPS}) - rozdz. 4.8.1 - uznane za punkty samoostrzenia, nie znalazły swojego odzwierciedlenia w przebiegach wskaźników obciążenia jednostkowego składowymi siły szlifowania. Oznacza to, że wskaźnikami tymi nie można zastąpić pomiarów geometrii CPS w celu dokładnego określenia jej zużycia, gdyż nie odzwierciedlają one dokłanie zmian zachodzących na powierzchni ściernicy.

Wykresy zamieszczone poniżej (tab. 4.8.13, \Box 152) prezentują zależności występujące pomiędzy otrzymanymi wskaźnikami obciążenia jednostkowego powierzchni kontaktu składowymi siły szlifowania, a określonymi parametrami mikro- i makrozużycia CPS, wyrażonymi parametrami B_{kr} (długość czynna krawędzi ściernicy) oraz l_{st} (starcie wierzchołków).

Analiza tych zależności wykazała istnienie wyraźnej korelacji zachodzącej pomiędzy rozpatrywanymi parametrami (wartości R i R^2). Jak można było się spodziewać, najsilniejsza relacja zachodzi pomiędzy wskaźnikami q_{Fc} i q_{Fn} , a szerokością czynną ściernicy (B_{kr}), gdyż parametr ten jest ich bezpośrednią składową (wzory 4.8., D149 oraz 4.8.14, D149). Wraz ze

wzrostem zaokrąglenia krawędzi ściernicy od strony jej natarcia na przedmiot obrabiany, następował wyraźny spadek wartości obciążenia jednostkowego powierzchni kontaktu *przedmiot - narzędzie*. Spadek ten wynikał z powiększenia powierzchni kontaktu, a tym samym udziału większej liczby ostrzy skrawających w procesie usuwania materiału i rozłożenia całej pracy potrzebnej do wykonania zadania na większą ilość ziaren.



Tab. 4.8.13. Zależność wartości wskaźników q_{Fc} i q_{Fn} siły szlifowania od szerokości czynnej ściernicy (B_{kr}) oraz średniego odcinka starcia wierzchołków zarysu czynnej powierzchni ściernicy (l_{st})

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności a = 0,05.

Średni odcinek starcia wierzchołków zarysu czynnej powierzchni ściernicy (l_{st}) nie charakteryzował się już tak wysoką korelacją z rozpatrywanymi wskaźnikami. Wzrost starcia wierzchołków ziaren tylko sporadycznie powodował nieznaczne obniżenie wartości q_{Fn} lub q_{Fc} . Odzwierciedleniem powyższego były niskie wartości standaryzowanych współczynników (kolumna *st. współ.*) oraz niekorzystne wyniki testów statystycznych.

Ponieważ otrzymane zależności nie charakteryzowały się dostatecznie wysoką korelacją, podobnie jak to miało miejsce w przypadku rozpatrywania relacji wartości składowych F_c i F_n siły szlifowania z szerokością czynną ściernicy (B_{kr}) oraz średnim odcinkiem starcia wierzchołków zarysu czynnej powierzchni ściernicy (l_{st}), nie wykonano dla nich dopasowania i wykreślenia wykresów powierzchniowych. Pozostałe wykresy regresji wielorakiej q_{Fn} i q_{Fc} w funkcji parametrów geometrycznych B_{kr} oraz l_{st} , zamieszczono w rozdz. Z.4.2.2 załącznika do rozprawy.

Analiza wyników, podobnie jak w przypadku zarejestrowanych składowych siły szlifowania, wykazała istnienie wyraźnej zależności pomiędzy wyznaczonymi wskaźnikami obciążenia jednostkowego powierzchni kontaktu, a wskaźnikiem zdolności skrawnej K_{CPS} (tab. 4.8.14, D153 oraz tab. 4.8.15, D154).

Tab. 4.8.14. Wartości w	vskaźników obciążeni	ia jednostkowego war	stwy wierzchniej sł	dadową styczną siły
szlifowania	$\mathfrak{a}(q_{Fc})$ w funkcji geon	netrycznego wskaźnik	ka zdolności skrawr	iej ściernicy (K_{CPS})

T1-250x32x98-99A60J7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5$ [m/s], $a_e = 0,03$ [mm], $f_a = 0,3$ [mm/skok], $Q_c = 3 \times 10^{-3}$ [m ³ min ⁻¹]				T1-250x32x9 NC10 (60 \pm 2) $f_a = 0,3$ [mm/	$P_{s}=27,50$ (98-99A60M7V- (900) HRC, $v_s = 27,50$ (900)	42m/s, 5 [m/s], $a_e = 0,0$ $10^{-3} [m^3 min^{-1}]$)3 [mm],
			$v_{ft} = 14$	[m/min]			
10 10 10 8 6 0 0,06 0,06	0,05 0,04	0,03 0,02	□ powt. 1 ○ powt. 2 △ powt. 3 □ 0,01 K _{CPS}	10 8 6 4 2 0,06	powt. 1 powt. 2 powt. 3 0,05 0,04	0,03 0,02	0,01 K _{CPS}
$q_{Fc(l)} = 1,09+19$	$90,96 \cdot K_{CPS(1)}$ -3207	$84 \cdot (K_{CPS(l)})^2$		$q_{Fc(l)} = -1,90+5$	516,57· <i>K_{CPS(1)}</i> -698	$4,60 \cdot (K_{CPS(l)})^2$	
	współ.	t ₍₁₁₎	poziom p		współ.	t ₍₁₃₎	poziom p
w. wolny	1,09	1,28947	0,223689	w. wolny	-1,90	-1,24966	0,233455
$K_{CPS(1)}$	190,96	2,17427	0,052386	$K_{CPS(1)}$	516,57	3,47627	0,004096
$(K_{CPS(1)})^2$	-3207,84	-1,97768	0,073560	$(K_{CPS(1)})^2$	-6984,60	-2,61405	0,021427
$q_{Fc(2)} = 0,39+23$	89,71· <i>K_{CPS(2)}</i> -3584	$(K_{CPS(2)})^2$		$q_{Fc(2)} = 0,37+30$	$03,34 \cdot K_{CPS(2)}$ -3608	$8,96 \cdot (K_{CPS(2)})^2$	
	współ.	t ₍₁₁₎	poziom p		współ.	t ₍₁₃₎	poziom p
w. wolny	0,39	0,73628	0,476967	w. wolny	0,37	0,308408	0,762658
$K_{CPS(2)}$	289,71	5,15682	0,000315	$K_{CPS(2)}$	303,34	2,012274	0,065386
$(K_{CPS(2)})^2$	-3584,29	-3,73856	0,003274	$(K_{CPS(2)})^2$	-3608,96	-0,972390	0,348603
$q_{Fc(3)} = 0,85+2$	16,89· <i>K_{CPS(3)}</i> -3252	$,32 \cdot (K_{CPS(3)})^2$		$q_{Fc(3)} = -1,60+4$	182,82· <i>K_{CPS(3)}</i> -656	$2,32 \cdot (K_{CPS(3)})^2$	
	współ.	t ₍₁₁₎	poziom p		współ.	t ₍₁₃₎	poziom p
w. wolny	0,85	1,22855	0,244878	w. wolny	-1,60	-2,06884	0,059053
K _{CPS(3)}	216,89	2,51580	0,028689	$K_{CPS(3)}$	482,82	6,51490	0,000020
$(K_{CPS(3)})^2$	-3252,32	-1,63290	0,130759	$(K_{CPS(3)})^2$	-6562,32	-5,12119	0,000196
R	$q_{Fc(1)};$ $f(K_{CPS(1)})$ 0,561057	$q_{Fc(2)}$: $f(K_{CPS(2)})$ 0,90915	$q_{Fc(3)}$: $f(K_{CPS(3)})$ 0,781750	R	$q_{Fc(1)}$: $f(K_{CPS(1)})$ 0,83071	$q_{Fc(2)}$: $f(K_{CPS(2)})$ 0,82527	$q_{Fc(3)}$: $f(K_{CPS(3)})$ 0,91947
R ²	0,314785	0,82655	0,611133	R ²	0,69007	0,68108	0,84543
R ² skor.	0,190200	0,79501	0,540430	R ² skor.	0,64239	0,63201	0,82165
F _(2,11)	2,526675	26,20930	8,643652	F _(2,13)	14,47281	13,88114	35,55114
р	0,125040	0,00007	0,005545	р	0,00049	0,00059	0,00001
$F_{kr(2,11)} = 3,92$ $t_{kr(0,05;11)} = 2,22$	8 010			$F_{kr(2,13)} = 3,74$ $t_{kr(0,05;13)} = 2,10$	4 604		

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Największe wartości wskaźników q_{Fc} oraz q_{Fn} pojawiające się w początkowym okresie pracy ściernicy, skupiły się w strefie najwyższych wartości wskaźnika zdolności skrawnej (K_{CPS}), co wynikało z małego pola strefy szlifowania (powierzchni kontaktu *przedmiot ściernica*) oraz dużej intensywności wykruszeń ziaren i spoiwa.

Wykresy ujawniły wyraźną tendencję spadku wartości rozpatrywanych wskaźników wraz z upływem czasu szlifowania i stopniową utratą zdolności skrawnej ściernic. Jednostkowe obciążenie strefy szlifowania przybierało znacznie mniejsze wartości dla ściernicy o nominalnie mniejszej twardości. Wynika to z faktu większych wzrostów długości krawędzi skrawającej (parametr B_{kr}) oraz mniejszej sumarycznej powierzchni starcia wierzchołków ziaren w obrębie czynnej powierzchni ściernicy (parametr l_{st}).



Tab. 4.8.15. Wartości wskaźników obciążenia jednostkowego warstwy wierzchniej składową normalną siły szlifowania (q_{Fn}) w funkcji geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej ściernicy (K_{CPS})

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Analiza statystyczna otrzymanych korelacji wskazuje na względnie niskie dopasowanie otrzymanych modeli do danych (wartości R^2), co potwierdzone jest istnieniem nieznaczących statystycznie współczynników regresji w wielu analizowanych przypadkach. Ponadto, otrzymane relacje są często rozbieżne, co może świadczyć o istnieniu korelacji, ale charakteryzujących się dużą czułością na czynniki zakłócające. Statystyczny brak istotności potwierdzono porównując wartości testu F z jego wartością krytyczną. Świadczą o tym, też wartości *poziomu-p*, które są często większe od przyjętej wartości poziomu istotności α .

Oznacza to, że istnieją przesłanki do odrzucenia (na poziomie $\alpha = 0,05$) hipotezy o istotności wyznaczonej zależności, co równoznaczne jest z koniecznością przyjęcia hipotezy alternatywnej, która mówi o braku statystycznego związku pomiędzy rejestrowanymi wartościami wskaźników obciążenia jednostkowego powierzchni składnymi siły szlifowania, a geometrycznym zużyciem narzędzia.

Pomimo powyższej omówionych aspektów, wyniki wykazały istnienie silniejszej relacji pomiędzy wskaźnikami q_{Fc} i q_{Fn} , a wskaźnikiem K_{CPS} , niż miało to miejsce w przypadku analizy wyników dla składowych siły szlifowania (F_c , F_n) nieodniesionych do powierzchni kontaktu, którą obciążają.

Reasumując, wskaźniki q_{Fc} oraz q_{Fn} mogą w pewnym zakresie stanowić wystarczająco dokładny i czuły parametr do pośredniej oceny charakteru pracy ściernicy pracującej w warunkach postępującego tępienia. Tym samym mogą posłużyć do oceny zużycia ściernicy, wyznaczenia jej okresu trwałości (w przypadku określenia poziomu odniesienia i maksymalnego przyrostu), a także pośrednio pozwalają wnioskować o wynikach procesu szlifowania poprzez powiązanie rejestrowanych wartości tych wskaźników ze wskaźnikami jakościowymi powierzchni obrabianej. Ich ścisłe korelacje ze zmianami naprężeń własnych w warstwie wierzchniej szlifowanych przedmiotów przedstawiono w pracach [PliS1986, PliJ1988.2, PliS1988, PP1990] oraz w ograniczonym zakresie zbadano w ramach realizacji niniejszej pracy. Wyniki zamieszczono w dalszej części rozdziału.

Analiza mocy szlifowania

Zmiany składowych siły szlifowania powiązane były ściśle ze zmianami energii potrzebnej na usunięcie danej objętości materiału, a także rejestrowanej mocy szlifowania. Wynika to z faktu, że wpływ wielkości powierzchni starcia wierzchołków ziaren jest ściśle związany z wartościami siły F_n , a co za tym idzie, z pracą tarcia. Z kolei wielkością charakteryzującą czasowy przebieg pracy jest moc:

$$P_s = F_c \cdot v_s \left[\mathbf{N} \cdot \frac{\mathbf{m}}{\mathbf{s}} \right]. \tag{4.8.15}$$

Analiza mocy szlifowania, która stanowi podstawę m.in. przy ocenie przebiegu procesu obróbki na jakość warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego, przeprowadzono w oparciu o bezwzględną wartość mocy szlifowania (P_s) oraz względną moc szlifowania (p_s), która odniesiona jest do wydajności objętościowej szlifowania. Ponieważ w badaniach otrzymano bardzo zbliżone przebiegi obu parametrów wyjściowych procesu, ich analiza wskazywała na identyczne wnioski, w pracy zdecydowano się zaprezentować jedynie wyniki dotyczące względnej mocy szlifowania:

$$p_s = \frac{P_s}{Q_w} = \frac{F_c \cdot v_s}{Q_w} \left[\mathbf{W} \cdot \mathbf{s} \,/\, \mathbf{mm^3} \right]. \tag{4.8.16}$$

W większości rozpatrywanych przypadków zaobserwowano zbliżone przebiegi zmian mocy szlifowania odnośnie kształtu krzywych opisujących zachodzące zjawiska w strefie szlifowania, jak i poziomu odnotowanych wartości (rys. 4.8.34, \Box 156). Dla badanych warunków, ściernice pracowały z wyraźną tendencją spadku mocy szlifowania odwrotnie proporcjonalną do funkcji prędkości posuwu wzdłużnego stołu szlifierki (v_{ft}). Szybsze względne przemieszczanie się próbki względem ściernicy, powodowało zwiększenie elementarnych przekrojów warstwy skrawanej pojedynczym ziarnem (a_{zsr}), rys. 4.8.3 (\Box 102), co powodowało zmniejszenie zapotrzebowania na łączną moc, konieczną do odkształcenia materiału obrabianego.



Rys. 4.8.34. Wpływ warunków obróbki oraz zużycia narzędzia na średnie zarejestrowane wartości względnej mocy szlifowania

Analiza wykresów wartości mocy szlifowania, zarejestrowanych podczas obróbki kolejnych próbek, wykazała wytrzymałościowy charakter pracy ściernic w początkowym okresie, wynikający ze zjawiska wyrywania ziaren ściernych osłabionych w zabiegu obciągania. W tym czasie, zarówno wartości składowych siły, jak i mocy szlifowania wyraźnie wzrastały. Utrata zdolności skrawnych wywoływała odpowiednią reakcję zapotrzebowania na moc potrzebną do przeprowadzenia dalszego procesu szlifowania. Reakcja ta była ściśle uzależniona od charakteru z jakim następowało zużycie ściernicy. Lokalne zmiany wartości siły, jak i mocy szlifowania, wywołane były zjawiskami samoostrzenia CPS, które z kolei były skutkiem rosnącego obciążenia ziaren skrawnych w trakcie postępującego zużycia ściernic.

Spadki mocy szlifowania można wytłumaczyć redukcją oddziaływania składowej stycznej siły szlifowania w układzie *ziarno - materiał obrabiany*. Natomiast wzrosty mocy następowały w tych zakresach zmienności obciążenia ziaren, w których nie następowało zjawisko samoistnego odnawiania czynnej powierzchni ściernic. Tym samym nie odnotowano odsłonięcia nowych ostrych wierzchołków, które przejmowałyby proces mikroskrawania i obniżyłyby chwilowe zapotrzebowanie na moc.

Powyżej przeanalizowane zmiany wyraźnie wskazują na istnienie ścisłego związku pomiędzy postępującym, wraz ze wzrostem objętości usuwanego materiału (V_w), zużyciem ściernicy, a rejestrowanymi wartościami mocy szlifowania.

Korelacja składowych siły szlifowania z naprężeniami własnymi warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego

Ponieważ wzrost pracy tarcia (wynikający z postępującego zużycia ściernego) jest przyczyną podwyższania temperatury w strefie szlifowania, a w tym i powierzchni przedmiotu poddanego obróbce, w niniejszej pracy analizie poddano wartości naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego (rozdz. 4.8.2). Poniżej zaprezentowano relacje, jakie otrzymano w badaniach eksperymentalnych pomiędzy wyznaczonymi naprężeniami własnymi warstwy wierzchniej szlifowanych przedmiotów, a rejestrowanymi w trakcie przebiegu procesu wartościami składowych siły szlifowania ściernicami charakteryzującymi się postępującym zużyciem.

Ponieważ analizowane ściernice ulegają zużyciu, m.in. poprzez wzrost czynnej szerokości ściernicy, co prowadzi do wzrostu powierzchni strefy styku, a to z kolei powoduje wzrost siły i energii szlifowania, wstępna analiza zależności zachodzącej pomiędzy naprężeniami, a wartościami składowych siły szlifowania, sugeruje że należałoby się spodziewać proporcjonalnego wzrostu naprężeń w warstwie wierzchniej wraz ze zmianami rejestrowanych wartości sił.

T1-250x32x98-99A60J7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5$ [m/s], $a_e = 0,03$ [mm], $f_a = 0,3$ [mm/skok], $Q_c = 3 \times 10^{-3}$ [m ³ min ⁻¹]	T1-250x32x98-99A60M7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5$ [m/s], $a_e = 0.03$ [mm], $f_a = 0.3$ [mm/skok], $Q_c = 3 \times 10^{-3}$ [m ³ min ⁻¹]
$v_{fl} = 14$	4 [m/min]
$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 $	$ = 708 0025 \pm 5678 E $
$\sigma_{max} = 260, 4/3/ + 7,0358 \cdot F_n$	$\sigma_{max} = 798,0025-1,567/8 \cdot F_n$
w wolny 2604737 1077532 0341890	w wolny 798 0025 1 889142 0 155286
W_{n} <	F_n -1,5678 -0,186976 0,863610
$\sigma_{max} = -5,97068 + 31,45365 \cdot F_c$ $współ. t_{(4)} poziom p$ $w. wolny -5,97068 -0,013608 0,989794$ $F_c 31,45365 1,523351 0,202341$	$\sigma_{max} = 847,5116-5,5428 \cdot F_c$ $współ. t_{(3)} poziom p$ $w. wolny 847,5116 2,000122 0,139309$ $F_c -5,5428 -0,307188 0,778790$
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $
$\begin{array}{ll} F_{kr(1,4)} &= 7,71 \\ t_{kr(0,05,4)} &= 2,7764 \end{array}$	$\begin{array}{ll} F_{kr(1,3)} &= 10,1 \\ t_{kr(0,05;3)} &= 3,1824 \end{array}$

Tab. 4.8.16. Zmiany wartości naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego (σ_{max}) w funkcji rejestrowanych wartości składowych siły szlifowania (F_n, F_c)

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Jednakże, ponieważ składowe siły szlifowania mogą rosnąć w różnych warunkach pracy ściernicy, nie tylko z powodu postępującego tępienia, a także w warunkach samoostrzenia i wzrostu szerokości starcia CPS, to ich wzrost nie zawsze można utożsamiać ze zwiększeniem się wartości naprężeń w warstwie wierzchniej szlifowanego przedmiotu. Powyższą hipotezę potwierdziła dogłębna analiza statystyczna bezpośredniej korelacji wartości naprężeń w funkcji rejestrowanych wartości składowych siły szlifowania (tab. 4.8.16, D157).

W badaniach, w każdym z analizowanych przypadków, uzyskano bardzo niskie współczynniki korelacji i determinacji (R^2), co świadczy o braku dopasowania linii regresji do danych doświadczalnych. Powyższe wnioski potwierdza brak spełnienia testu *Fishera-Snedecora*, co z kolei oznacza, że estymowane równania regresji są statystycznie nieadekwatne do danych. Ponadto, obliczone wartości statystyki *t-Studenta* nigdy nie spełniają warunku przyjęcia założonej hipotezy o istotności statystycznej otrzymanych współczynników.

Wszystkie powyższe elementy świadczą o konieczności odrzucenia przyjętej hipotezy (dla założonego poziomu istotności $\alpha = 0.05$) i przyjęciu hipotezy alternatywnej, która świadczy o braku związku statystycznego między składowymi siły szlifowania, a oszacowanymi naprężeniami rozciągającymi w warstwie wierzchniej przedmiotów szlifowanych.



Tab. 4.8.17. Zmiany wartości naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego (σ_{max}) w funkcji obciążenia jednostkowego powierzchni styku składowymi siły szlifowania (q_{Fn} , q_{Fc})

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Na wielkość powstających naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotów obrabianych w przeprowadzonych badaniach, wpływ mały nie tylko wartości sił, ale też wielkość powierzchni, na które oddziałują (czyli obciążenie ziarna w strefie szlifowania). Wyniki analiz dla wskaźników obciążenia jednostkowego strefy szlifowania w domenie czasu zaprezentowano we wcześniejszej części niniejszej pracy, natomiast poniżej opisano otrzymane korelacje pomiędzy obciążeniami jednostkowymi (q_{Fc} oraz q_{Fn}), a maksymalnymi naprężeniami rozciągającymi zalegającymi w warstwach wierzchnich badanych próbek.

Analiza otrzymanych korelacji wskazuje na względnie wysokie dopasowanie otrzymanego modelu do danych (wartości R), co potwierdzone jest istnieniem znaczących statystycznie współczynników regresji w niemal wszystkich przypadkach. Statystyczną istotność potwierdzono porównując wartości testu F z jego wartością krytyczną. Świadczą o tym też wartości *poziomu-p*, które są mniejsze od przyjętej wartości poziomu istotności α . Oznacza to, że nie ma przesłanek do odrzucenia hipotezy o istotności wyznaczonych zależności, czyli istnieje statystyczny związek pomiędzy rejestrowanymi wartościami wskaźników obciążenia jednostkowego powierzchni, a wartościami naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego.

Analizując przebiegi wyznaczonych funkcji oraz zmiany parametrów wyjściowych procesu szlifowania, można stwierdzić, że w początkowym okresie pracy ściernic, który charakteryzował się wysokimi przyrostami parametrów q_{Fc} i q_{Fn} , pomimo dużej intensywności wykruszeń ziaren, odnotowane wartości naprężeń były stosunkowo niewielkie. Dopiero po tym niestabilnym okresie czasu pracy ściernic, korelacja rozpatrywanych parametrów znacząco wzrosła. Wtedy to, niewielki wzrost wartości q_{Fn} i q_{Fc} powodował znaczący wzrost naprężeń (σ_{max}). Oznacza to, że poza krótkim okresem czasu (na początku okresu trwałości użytkowej ściernic), obserwuje się wyraźną korelację $\sigma_{max} = f(q_{Fc}, q_{Fn})$.

Analiza wyników badań wykazała, że udział ciepła przejmowanego przez przedmiot, a tym samym wielkość konstytuowanych naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego, w całym okresie pracy ściernicy, nie jest stała. Zależy ona głównie od wielkości strefy kontaktu ściernicy z powierzchnią szlifowaną $(B_{kr} \times l_g)$ oraz intensywności zmian CPS.

Korelacja składowych siły szlifowania z parametrami mikrogeometrii powierzchni przedmiotów szlifowanych

W poniższym podrozdziale opisano wyniki badań odnoszących się do oceny jakościowej oraz ilościowej związków zachodzących pomiędzy rejestrowanymi wartościami składowych siły szlifowania (w trakcie przebiegu procesu), a wybranymi parametrami mikrogeometrii powierzchni obrabianych (ocenianych po zakończeniu procesu).

Na wykresach w tablicach 4.8.18 (\Box 160) oraz 4.8.19 (\Box 161) zgromadzono wyniki analiz statystycznych, w tym także oszacowane zależności, jakie występowały pomiędzy rejestrowanymi składowymi siły szlifowania, a wybranymi geometrycznymi parametrami powierzchni obrabianej: średnią arytmetyczną rzędnych profilu ($R_{a(w)}$) oraz średnim odstępem miejscowych wzniesień profilu chropowatości próbek ($RS_{m(w)}$).

Analiza relacji parametrów chropowatości powierzchni obrabianych z zasadniczymi wartościami siły szlifowania (F_c , F_n), czyli nieodniesionymi do wielkości powierzchni, na która oddziałują, wykazała niemal całkowity brak zależności.

T1-250x32x9 NC10 (60 \pm 2) $f_a = 0,3 \text{ [mm/]}$	$P_{s}=27,50$ HRC, $v_s = 27,50$ skok], $Q_c = 3 \times 10^{-10}$	2m/s, 5 [m/s], $a_e = 0.0$ 10 ⁻³ [m ³ min ⁻¹]	3 [mm],	T1-250x32x9 NC10 (60 \pm 2) $f_a = 0,3 \text{ [mm/]}$	$P_{s-99A60M7V-4}$ HRC, $v_s = 27,5$ skok], $Q_c = 3 \times 1$	42m/s, $[m/s], a_e = 0,0$ $0^{-3} [m^3 min^{-1}]$	3 [mm],
			$v_{ft} = 14$	[m/min]			
0,35 0,30 0,25 0,20 0,15 0,10 0,05 0 0			□ powt. 1 ○ powt. 2- △ powt. 3 □ □ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0,35 0,30 0,25 0,20 0,20 0,15 0,10 0,05 0 0			 powt. 1 powt. 2- powt. 3 70 80 F_n[N]
$R_{a(w)(1)} = 0,1843$	$332-0,000892 \cdot F_{n(l)}$	1)		$R_{a(w)(1)} = 0,1249$	$914-0,000254 \cdot F_{n(1)}$)	
	współ.	t ₍₁₂₎	poziom p		współ.	t ₍₁₄₎	poziom p
w. wolny	0,184332	5,33227	0,000179	w. wolny	0,124914	6,847564	0,000008
$R_{a(w)(2)} = 0,0920$	0.00000000000000000000000000000000000	2)	0,135175	$R_{a(w)(2)} = 0,0998$	$839+0,000242 \cdot F_{n()}$	2)	0,010212
	współ.	t ₍₁₂₎	poziom p		współ.	t ₍₁₄₎	poziom p
w. wolny	0,092038	4,84283	0,000403	w. wolny	0,099839	3,073744	0,008252
$F_{n(2)}$	-0,000506	-1,67172	0,120431	$F_{n(2)}$	0,000242	0,398023	0,696617
$R_{a(w)(3)} = 0,117^{\prime}$	798-0,000355 $\cdot F_{n(3)}$	3)		$R_{a(w)(3)} = 0,2333$	$335-0,002326 \cdot F_{n(3)}$		
	współ.	t ₍₁₂₎	poziom p		współ.	t ₍₁₄₎	poziom p
w. wolny	0,117798	5,56170	0,000123	w. wolny	0,233335	6,25674	0,000021
$F_{n(3)}$	-0,000355	-1,01645	0,329470	$F_{n(3)}$	-0,002326	-3,154/2	0,007025
	$R_{a(w)(l)}:$ $f(F_{n(l)})$	$R_{a(w)(2)}$: $f(F_{n(2)})$	$ \begin{array}{c} R_{a(w)(3)}:\\ f(F_{n(3)}) \end{array} $		$ \begin{array}{c} R_{a(w)(1)}:\\ f(F_{n(1)}) \end{array} $	$R_{a(w)(2)}:$ $f(F_{n(2)})$	$R_{a(w)(3)}:$ $f(F_{n(3)})$
R	0,421647	0,434621	0,281555	R	0,175251	0,105779	0,644596
R^2	0,177786	0,188896	0,079273	R^2	0,030713	0,011189	0,415504
R ² skor.	0,109268	0,121304	0,002546	R ² skor.	-0,038522	-0,059440	0,373755
F _(1,12)	2,594737	2,794647	1,033179	F _(1,14)	0,443606	0,158422	9,952280
р	0,133193	0,120431	0,329470	р	0,516212	0,09001/	0,007025
$\begin{array}{l} F_{kr(1,12)} &= 4,73 \\ t_{kr(0,05;12)} &= 2,1 \end{array}$	5 788			$\begin{array}{l} F_{kr(1,14)} &= 4,60 \\ t_{kr(0,05;14)} &= 2,14 \end{array}$) 448		

Tab. 4.8.18. Zmiany średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości powierzchni próbek $(R_{a(w)})$ w funkcji zarejestrowanych wartości składowej normalnej siły szlifowania (F_n)

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Oznacza to, że wartości składowych siły szlifowania są całkowicie nieprzydatne w ocenie jakości geometrycznej powierzchni obrabianej i nie mogą, bez powiązania z innymi elementami, w żadnym stopniu zastąpić pomiarów metrologicznych. Wyniki wykazały, że dopiero jednoczesna interpretacja zmian wartości składowych siły szlifowania może być przydatna w kwestii wnioskowania o kierunku zmian parametrów chropowatości powierzchni obrabianej. Jednakże, i w tym przypadku nie odnotowano na tyle wysokiej korelacji określonej parametrami R i R^2 , aby uznać ją jednoznaczną (tab. 4.8.20, D162).

T1-250x32x9 NC10 (60 \pm 2) $f_a = 0,3$ [mm/	P8-99A60J7V-4 HRC, $v_s = 27,5$ skok], $Q_c = 3 \times 1$	2m/s, 5 [m/s], $a_e = 0.0$ 0^{-3} [m ³ min ⁻¹]	3 [mm],	T1-250x32x9 NC10 (60 \pm 2) $f_a = 0.3$ [mm/	$P_{s-99A60M7V}$ HRC, $v_s = 27,3$ (skok], $Q_c = 3 \times$	42 m/s, 5 [m/s], $a_e = 0,0$ $10^{-3} [\text{m}^3 \text{min}^{-1}]$	03 [mm],
	-		$v_{ft} = 14$	[m/min]	-		
0,35 0,30 0,25 0,20 0,15 0,10 0,05 0,5			□ powt. 1 ○ powt. 2- △ powt. 3 □ 30 F _c [N]	0,35 0,30 0,25 E 0,25 0,15 0,10 0,05 5			 powt. 1 powt. 2_ powt. 3 35 F_c[N]
$R_{a(w)(l)} = 0,222$	752-0,004458 $\cdot F_{c(i)}$)		$R_{a(w)(l)} = 0,132^{\circ}$	$766-0,000910 \cdot F_{c}$	1)	
	współ.	t ₍₁₂₎	poziom p		współ.	t ₍₁₄₎	poziom p
w. wolny	0,222752	5,72979	0,000095	w. wolny	0,132766	4,384204	0,000623
$F_{c(l)}$	-0,004458	-2,43114	0,031667	$F_{c(l)}$	-0,000910	-0,646521	0,528400
$R_{a(w)(2)} = 0,094$	913-0,001554 $\cdot F_{c(2)}$)		$R_{a(w)(2)} = 0,1358$	871-0,001141 $\cdot F_{c}$	2)	
	współ.	t ₍₁₂₎	poziom p	ļ	współ.	t ₍₁₄₎	poziom p
w. wolny	0,094913	3,93518	0,001980	w. wolny	0,135871	3,667124	0,002537
$F_{c(2)}$	-0,001554	-1,42215	0,180452	$F_{c(2)}$	-0,001141	-0,682759	0,505901
$R_{a(w)(3)} = 0,131$	$325-0,001674 \cdot F_{c(3)}$)		$R_{a(w)(3)} = 0,2094$	464-0,004277 $\cdot F_{c}$	3)	
	współ.	t ₍₁₂₎	poziom p		współ.	t ₍₁₄₎	poziom p
w. wolny	0,131825	5,11235	0,000256	w. wolny	0,209464	4,06672	0,001155
$F_{c(3)}$	-0,001674	-1,38103	0,192448	$F_{c(3)}$	-0,004277	-1,75163	0,101704
	· · ·	· ·	· ·		· · ·	• •	
	$R_{a(w)(1)}$:	$R_{a(w)(2)}$:	$R_{a(w)(3)}$:		$R_{a(w)(1)}$:	$R_{a(w)(2)}$:	$R_{a(w)(3)}$:
	$f(F_{c(l)})$	$f(F_{c(2)})$	$f(F_{c(3)})$		$f(F_{c(l)})$	$f(F_{c(2)})$	$f(F_{c(3)})$
R	0,574456	0,379780	0,370324	R	0,170267	0,179511	0,423982
R ²	0,329999	0,144233	0,137140	\mathbb{R}^2	0,028991	0,032224	0,179761
R ² skor.	0,274166	0,072919	0,065235	R ² skor.	-0,040367	-0,036903	0,121173
F _(1,12)	5,910429	2,022501	1,907237	F _(1,14)	0,417989	0,466160	3,068196
р	0,031667	0,180452	0,192448	р	0,528400	0,505901	0,101704
$F_{kr(1,12)} = 4,7$ $t_{kr(0,05;12)} = 2,1$	5 788			$F_{kr(1,14)} = 4,60$ $t_{kr(0,05;14)} = 2,12$	0 448		

Tab. 4.8.19. Zmiany średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości powierzchni próbek $(R_{a(w)})$ w funkcji zarejestrowanych wartości składowej stycznej siły szlifowania (F_c)

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności α = 0,05.

Interpretacja przebiegów kolejnych punktów pomiarowych na wykresach wskazuje na istnienie proporcjonalnych zmian parametru $R_{a(w)}$ w funkcji zmian F_c i F_n . Oznacza to spadek chropowatości wraz ze wzrostem tych wartości. Ponadto, analiza standaryzowanych wartości współczynników wskazała na większość współzależność składowej stycznej F_c siły szlifowania z parametrem R_a .

Odwrotną zależność odnotowano w przypadku interpretacji standaryzowanych wartości współczynników (kolumna *st. współ.*) dla parametru $RS_{m(w)}$. W tym przypadku, największy wpływ na przyjmowanie ostatecznej wartości odległości miedzy wzniesieniami profilu, stwierdzono dla składowej normalnej siły szlifowania (F_n).



Γab. 4.8.20. Zmiany średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości powierzchni próbek $(R_{a(w)})$
w funkcji zarejestrowanych wartości składowych siły szlifowania (F_n, F_c)

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Tab. 4.8.21. Zmiany średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości powierzchni próbek $(R_{a(w)})$ w funkcji obciążenia jednostkowego strefy kontaktu składową styczną siły szlifowania (q_{Fc})



(verte •)

Tab. 4.8.21. (ciąg dalszy)

T1-250x32x98-99A60J7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5$ [m/s], $a_e = 0,03$ [mm], $f_a = 0,3$ [mm/skok], $Q_c = 3 \times 10^{-3}$ [m ³ min ⁻¹]				T1-250x32x98-99A60M7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5$ [m/s], $a_e = 0,03$ [mm], $f_a = 0,3$ [mm/skok], $Q_c = 3 \times 10^{-3}$ [m ³ min ⁻¹]			
			$v_{ft} = 2$	24 [m/min]			
$R_{a(w)(l)} = 0,138$	8282+0,053079·q	Fc(1)		$R_{a(w)(1)} = 0,101$.311+0,021194·q	Fc(1)	
	współ.	t ₍₇₎	poziom p		współ.	tuo	poziom p
w. wolny	0,138282	6,294120	0,000406	w. wolny	0,101311	3,182767	0,005783
$q_{Fc(1)}$	0,053079	4,458650	0,002941	$q_{Fc(1)}$	0,021194	3,763441	0,001699
$R_{a(w)(2)} = 0,169$	9926+0,031085·q	Fc(2)		$R_{a(w)(2)} = 0,099$	0203+0,021222∙q	Fc(2)	
	współ.	t ₍₇₎	poziom p		współ.	t ₍₁₆₎	poziom p
w. wolny	0,169926	4,763015	0,002052	w. wolny	0,099203	2,960010	0,009216
$q_{Fc(2)}$	0,031085	1,811109	0,113031	$q_{Fc(2)}$	0,021222	3,804795	0,001557
$R_{a(w)(3)} = 0,167$	7057+0,012084·q	Fc(3)	n	$R_{a(w)(3)} = 0,136$	5681+0,015262·q	Fc(3)	noziom n
w. walny	0 167057	(7) 6 067042	0.000218	w. walny	0 126691	4 002051	0.000122
w. wonry	0.012084	0,907942	0.353038	w. wonny	0.015262	2 677861	0.016503
$\mathbf{Y}Fc(3)$	0,012084	0,994050	0,555058	QFc(3)	0,015202	2,077801	0,010505
	$R_{a(w)(1)}$	$R_{a(w)(2)}$.	$R_{a(w)(2)}$	<u>ا ۲</u>	$R_{a(w)(l)}$	$R_{a(w)(2)}$	$R_{a(w)(2)}$
	$f(a_{Fc(1)})$	$f(a_{EC(2)})$	$f(a_{Fc(3)})$		$f(a_{Fc(l)})$	$f(a_{Fc(2)})$	$f(a_{F_{c}(3)})$
R	0.85999	0,564866	0,351897	R	0,68524	0,68921	0,556309
R ²	0,73958	0,319074	0,123831	R ²	0,46956	0,47500	0,309480
R ² skor	0,70238	0,221799	-0,001336	R^{2}_{skor}	0,43640	0,44219	0,266322
F _(1,7)	19,87956	3,280117	0,989328	F _(1,16)	14,16349	14,47647	7,170940
р	0,00294	0,113031	0,353038	p p	0,00170	0,00156	0,016503
$F_{kr(1,7)} = 5,5$ $t_{kr(0,05;7)} = 2,5$	59 3646			$F_{kr(1,16)} = 4,4$ $t_{kr(0,05;16)} = 2,5$	19 1 1 9 9		

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Analogiczne rezultaty otrzymano w przypadku odniesienia zmian parametrów chropowatości powierzchni obrabianej do zarejestrowanych wartości jednostkowego obciążenia strefy składowymi siły szlifowania (q_{Fn} , q_{Fc}) – tab. 4.8.21 (\Box 162).

Tab. 4.8.22. Zmiany parametrów chropowatości powierzchni próbek $R_{a(w)}$ i $RS_{m(w)}$ w funkcji obciążenia jednostkowego strefy kontaktu składowymi siły szlifowania (q_{Fn}, q_{Fc})



(verte *)

Tab. 4.8.22. (ciąg dalszy)



Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności a = 0,05.

Wszystkie rozpatrywane parametry geometryczne ($R_{a(w)}$ oraz $RS_{m(w)}$), dla badanych warunków pracy ściernic i przyjętego poziomu istotności analiz statystycznych, wykazały brak korelacji ze wskaźnikami obciążenia jednostkowego, zarówno składową normalną (q_{Fn}), jak i składową styczną (q_{Fc}).

Podobnie, jak w przypadku analiz relacji ze składowymi siły szlifowani, zdecydowanie lepsze wskaźniki korelacji i determinacji (R^2) otrzymano w przypadku odniesienia parametru chropowatości $R_{a(w)}$ lub $RS_{m(w)}$ jednocześnie do zmian obu wskaźników q_{Fn} i q_{Fc} – tab. 4.8.22 (D163). Analiza wyników badań wykazała spadek wartości średniej arytmetycznej rzędnych profilu powierzchni próbek ($R_{a(w)}$) w funkcji regresji wartości wskaźników obciążenia jednostkowego powierzchni kontaktu składowymi siły szlifowania. Przy czym, wpływ poszczególnych wskaźników q_{Fn} i q_{Fc} nie jest już tak jednoznaczny, jak w przypadku składowych F_n i F_c nieodniesionych do powierzchni, którą obciążają. Wpływ ten okazał się zróżnicowany i zależny od parametrów obróbki oraz twardości ściernicy.

Wnioski ze zmian zarejestrowanych wartości składowych siły szlifowania

Wyniki badań wykazały wzrost wartości składowych siły szlifowania w funkcji utraty zdolności skrawnej ściernic, jednakże kierunek lokalnych rejestrowanych zmian ściśle zależał od aktualnego charakteru zużycia narzędzia.

Względnie wysoką korelacją z parametrami mikro- (l_{st}) i makrogeometrii (B_{kr}) CPS wykazały wskaźniki jednostkowego obciążenia strefy szlifowania składowymi siły szlifowania. Relacja ta odzwierciedliła się, także w przypadku odniesienia wskaźników q_{Fn} i q_{Fc} do wskaźnika zdolności skrawnej K_{CPS} .

Ścisłą i jednoznaczną relację odnotowano, także pomiędzy siłą szlifowania, a mocą potrzebną na wykonanie pracy w trakcie obróbki.

Brak wyraźnej korelacji pomiędzy przyrostami składowych siły szlifowania (F_c , F_n), a wzrostem naprężeń, spowodował, że dopiero posługiwanie się wskaźnikami obciążenia jednostkowego w ocenie kierunku zmian własności fizycznych warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego (w tym głównie naprężeń własnych) dało pozytywne rezultaty w postaci relacji o wysokim dopasowaniu danych doświadczalnych do wyznaczonych modeli. Wyniki badań wykazały, że wskaźniki q_{Fc} oraz q_{Fn} mogą stanowić dobry parametr do pośredniej oceny zmian naprężeń w warstwie wierzchniej.

W przypadku oceny mikrogeometrii powierzchni przedmiotów poddanych obróbce, składowe siły szlifowania wykazały znacznie niższą użyteczność. Wyniki badań i analiz wskazują, że mogą one jedynie pomóc we wskazaniu kierunku zmian, jakie możemy oczekiwać, szczególnie przy odniesieniu składowych siły szlifowania do wielkości powierzchni, jakie obciążają.

4.8.4. Analiza zmian sygnałów emisji akustycznej

Analizę zmian zarejestrowanych sygnałów emisji akustycznej (EA_{RAW}) oparto o interpretację postaci przetworzonej do wartości skutecznej tego sygnału (EA_{RMS}).

Do wyjaśnienia zmian wartości sygnału EA, a tym samym jej wartości skutecznej, postanowiono wykorzystać najważniejszy czynnik, który z dużą dokładnością pozwala ocenić okres trwałości ściernic, czyli zużycie geometryczne czynnej powierzchni ściernicy (wyrażone parametrem K_{CPS}). Szczegółowa analiza zmian (zamieszczona w rozdz. 4.8.1) wykazała, że niemal dla każdego wykonanego powtórzenia eksperymentów, zaistniały wyraźne punkty samoodnowienia się ściernicy.

W funkcji czasu pracy ściernicy (*t*), a tym samym, także w funkcji ubytku materiału szlifowanego (V_w), zarejestrowane sygnały EA_{RMS} charakteryzowały się ogólną tendencją wzrostu wartości w postaci zbliżonej do przebiegu funkcji logarytmicznej, co przedstawiono na wykresach zawierającymi kolejne powtórzenia eksperymentu (rys. 4.8.35, D166).



Rys. 4.8.35. Zarejestrowane zmiany wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej (*EA_{RMS}*) w analizowanych warunkach i okresie czasu pracy badanych ściernic

Na wykresach zaznaczono punkty charakterystyczne dla zjawiska samoostrzenia, które zostały określone na podstawie zmienności wskaźnika K_{CPS} . Usytuowanie tych punktów na wykresach przedstawiających zmiany parametru EA_{RMS} w funkcji czasu pracy badanych ściernic, wykazało wysoką zgodność. Punkty te (około 78% dla 99A60J7V i około 81% w przypadku ściernicy 99A60M7V) wystąpiły w momencie, gdy zarejestrowano spadek wartości skutecznej EA. Tablice zawierające szczegółowe porównanie omawianego problemu zamieszczono w załączniku do rozprawy (rozdz. Z.4.3).

Odnosząc wartości sygnałów emisji akustycznej tylko do zmian geometrycznych CPS, stwierdzono, że wartości EA_{RMS} wyraźnie maleją w momentach, gdy ściernica wykazywała większe zdolności skrawne, czyli gdy charakteryzowała się znaczną liczbą wierzchoł-

ków ziaren w strefie szlifowania o względnie dużych wysokościach i ostrych krawędziach (czyli małym starciu).

Odwrotną tendencję zanotowano dla postępującego tępienia ściernic. Wtedy sygnały EA_{RMS} przybierały większe wartości, rosnące w funkcji czasu. Należy podkreślić, że lokalne punkty samoostrzenia, wyrażone większymi wartościami wskaźnika K_{CPS} i malejącymi wartościami EA_{RMS} , musiały następować tylko w przypadku wykruszeń ziaren z CPS bez znaczącego zwiększania powierzchni styku (parametr B_{kr}), gdyż takie zjawisko jest niekorzystne z punktu widzenia trwałości narzędzia. Duża utrata materiału przez ściernicę jest niekorzystna i wpływa ujemnie na wartość wskaźnika K_{CPS} . Z powyższego, można wywnioskować, że w odniesieniu jedynie do geometrycznych skutków zmian topografii CPS, sygnały emisji akustycznej zachowały się wg zależności:

$$EA_{RMS} \uparrow = f\left(S_{st} \downarrow^2, a_{zsr} \uparrow^2, R_c \downarrow^2, l_{st} \uparrow^2, B_{kr} \uparrow^2\right), \tag{4.8.17}$$

$$EA_{RMS} \downarrow = f\left(S_{st}\uparrow^2, a_{zsr}\downarrow^2, R_c\uparrow^2, l_{st}\downarrow^2, B_{kr}\uparrow^1\right).$$

$$(4.8.18)$$

Ponieważ, jednak sygnał EA kumulował w sobie, także fale sprężyste emitowane przez materiał poddany obróbce, a jego postać nie zależała tylko od zmian topografii CPS, to powyższe zależności należy uznać za poglądowe i stanowiące duże uproszczenie analizy przebiegu procesu (jednakże o wysokim poziomie korelacji, zbliżonym do 80%). Porównując wpływ wydajności objętościowej szlifowania Q_w (regulowanej poprzez zmienną wartość posuwu stycznego stołu v_{ft}), można jednoznacznie stwierdzić, że średnia wartość oraz tempo wzrostu parametru EA_{RMS} zależały od parametrów obróbki. Im większa wydajność Q_w , tym przebiegi charakteryzowały się mniejszym kątem nachylenia (tab. 4.8.23, \Box 167). Oznacza to, że zwiększanie wydajności objętościowej szlifowania niekorzystnie wpływało na czułość tego parametru (mierzonej, jako rozpiętość jego wartości).

Tab. 4.8.23. Wpływ prędkości posuwu stycznego stołu szlifierki (v_{fl}) na charakter zmian wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej (EA_{RMS})

T1-250x32x98-99A60J7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5$ [m/s], $a_e = 0,03$ [mm], $v_{fi} = \{4, 14, 24\}$ [m/min], $f_a = 0,3$ [mm/skok], $Q_c = 3 \times 10^{-3}$ [m ³ min ⁻¹]				T1-250x32x98 $v_s = 27,5 \text{ [m/s]}$ $f_a = 0,3 \text{ [mm/s]}$	8-99A60M7V-4], $a_e = 0,03$ [mr kkok], $Q_c = 3 \times 1$	$42m/s, NC10 (n], v_{ft} = \{4, 14 0^{-3} [m^{3}min^{-1}]\}$	(60±2) HRC, , 24} [m/min],
$\sum_{i=1}^{n} 1, 2$			2.5 2.0 5 5 1.5 1.0 1.0 1.0 0.5 0 0	200	400	$ v_{n} = 4 [m/min] v_{n} = 14 [m/min] v_{n} = 24 [m/min] 600 t [s] $	
v _{ft} [m/min]	4	14	24	v_{ft} [m/min]	4	14	24
		EA_{RMS} : $f(t)$				EA_{RMS} : $f(t)$	
R	0,92686	0,72241	0,644021	R	0,999980	0,649735	0,559793
R ²	0,85906	0,52187	0,414763	R ²	0,999959	0,422155	0,313368
R ² skor.	0,83893	0,48203	0,331157	R ² skor.	0,999878	0,333256	0,270453
F _(1,7)	42,66774	n.d.	4,960961	F _(2,1)	12283,90	n.d.	n.d.
F(1,12)	n.d.	13,09778	n.d.	F _(2,13)	n.d.	4,748698	n.d.
р	0,00032	0,00352	0,061212	F _(1,16)	n.d.	n.d.	7,302139
				р	0,00638	0,028299	0,015700
$F_{kr(1,7)} = 5,59, F_{kr}$	$r_{(1,12)} = 4,75$			$F_{kr(2,1)} = 200, F_{kr}$	$F_{(2,13)} = 3,81, F_{kr(1,1)}$	$_{16)} = 4,49$	

(verte *)

Tab. 4.8.23. (ciąg dalszy)

T1-250x32x98-99A60J7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5 \text{ [m/s]}, a_e = 0,03 \text{ [mm]}, v_{ft} = \{4, 14, 24\} \text{ [m/min]},$ $f_a = 0,3 \text{ [mm/skok]}, Q_c = 3 \times 10^{-3} \text{ [m^3min^{-1}]}$			T1-250x32x98-99A60M7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5 \text{ [m/s]}, a_e = 0,03 \text{ [mm]}, v_{fi} = \{4, 14, 24\} \text{ [m/min]},$ $f_a = 0,3 \text{ [mm/skok]}, Q_c = 3 \times 10^{-3} \text{ [m^3min^{-1}]}$					
	[m/min]							
$EA_{RMS} = 0,338123 + 0,120649 \cdot ln(t)$			$EA_{RMS} = 0,694$	4266-0,000350	0∙ <i>t</i> +0,000011	$(t)^2$		
W	vspół.	t ₍₇₎	poziom p		współ.	t ₍₁₎	ро	oziom p
w. wolny 0),338123	3,151983	0,016107	w. wolny	0,694266	5 308,8	776 0,	002061
t 0),120649	6,532055	0,000324	t	-0,00035	0 -5,786	55 O,	108942
				$(t)^{2}$	0,000011	41,02	30 0,	015516
$t_{kr(0,05;7)} = 2,3646$				$t_{kr(0,05;1)} = 12,7$	2062			
			$v_{ft} = 14$	[m/min]				
$EA_{RMS} = 0,659755 + 0$	-0,073231· <i>ln</i> (<i>t</i>)			$EA_{RMS} = 0.957350 + 0.001114 \cdot t - 0.000002 \cdot (t)^2$				
W	vspół.	t ₍₁₂₎	poziom p	st. współ. współ. t ₍₁₃₎ poziom p				
w. wolny 0),659755	6,419980	0,000033	w. wolny	n.d.	0,957350	20,06897	3,63E-11
t 0),073231	3,619085	0,003520	t	2,54431	0,001114	3,06841	0,008976
				$(t)^{2}$	-2,4002	-0,000002	-2,89464	0,012536
$t_{kr(0,05;12)} = 2,1788$				$t_{kr(0,05;13)} = 2,1604$				
			$v_{ft} = 24$	[m/min]				
$EA_{RMS} = 0,894135 + 0.0000$	-0,037779· <i>ln(t</i>)			$EA_{RMS} = 1,957$	7112-0,103432	$2 \cdot ln(t)$		
W	vspół.	t ₍₇₎	poziom p		współ.	t ₍₁₆₎	ро	oziom p
w. wolny 0),894135	12,06182	0,000006	w. wolny	1,957112	2 10,034	473 2,	617E-08
t 0),037779	2,22732	0,061212	t	-0,10343	2 -2,702	225 0,	015700
$t_{kr(0,05;7)} = 2,3646$				$t_{kr(0,05;16)} = 2,1199$				

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$.

Analizując uśrednione wartości EA_{RMS} z całego analizowanego okresu trwałości ściernic, stwierdzono, że wyższe wartości posuwu stycznego stołu szlifierki, a za razem większa dynamika przebiegu procesu, powodowały ogólne podniesienie rejestrowanych wartości emisji akustycznej.

W przypadku ściernicy o nominalnie większej twardości (99A60M7V) można wyróżnić okoliczności pracy, w których pracowała ona odmiennie. Były to warunki dla posuwu stycznego stołu $v_{ft} = 4$ oraz 24 m/min. Prawdopodobną przyczynę krótkiego czasu pracy ściernicy z najmniejszą nastawioną wartością posuwu ($v_{ft} = 4$ m/min) wyjaśniono we wcześniejszej części pracy (rozdz. 4.8.1), gdzie szczegółowo opisano charakter pracy ściernicy oraz formę jej zużycia. Ponadto, kolejne rozdziały zawierały opis wpływu niekorzystnych warunków na kształtowanie się właściwości powierzchni przedmiotów obrabianych (rozdz. 4.8.2) oraz wpływ omawianych warunków na wartości rejestrowanych sił i mocy szlifowania (rozdz. 4.8.3). Natomiast w przypadku posuwu o najwyższej wartości, to co wyróżnia wyniki pomiarów EA dla ściernicy 99A60M7V, to odmienne zachowanie się sygnału w skali czasu pracy ściernicy (tab. 4.8.23, D167). W omawianych warunkach doszło do udziału większej przypadkowości w tendencji następujących zmian. Z tego powodu, każde powtórzenie opisuje funkcja innego typu. W jednym z wykonanych powtórzeń (nr 3), doszło nawet do odwrócenia tendencji – wartości malały w miarę szlifowania kolejnych próbek (kolejne punkty pomiarowe ułożyły się na kształt odwróconej funkcji logarytmicznej $y = \log_a x$, gdzie a < 1).

Zmiany lokalne (zachowanie się sygnału w trakcie odnowienia lub tępienia ściernicy) pozostały tożsame z pozostałymi przypadkami – wzrost wartości wskaźnika zdolności skrawnej odzwierciedlał się w postaci spadku wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej. Przyczyną takiej sytuacji była najprawdopodobniej bardzo wysoka dynamika przebiegu procesu szlifowania dla zastosowanej twardości ściernicy i materiału obrabianego. W początkowej fazie, zmiany w strefie szlifowania musiały być na tyle intensywne, że przełożyły się na niezwykle silne źródła fal sprężystych, a tym samym wzrost wartości sygnałów EA i jej wartości skutecznej.

Wartości zarejestrowanych sygnałów EA, poza omówionymi elementami, zależały od zjawisk zachodzących w układzie *narzędzie - przedmiot obrabiany*, takich jak tarcie, oddziaływanie sprężyste, a także od zmian zachodzących w szlifowanym materiale, czyli powstawania i wzrostu mikropęknięć, odkształceń plastycznych oraz przemian fazowych. Analizę sygnałów emisji akustycznej uwzględniającą powyżej wymienione aspekty omówiono w dalszej części niniejszego rozdziału, gdzie określono korelacje wartości EA z pozostałymi czynnikami wyjściowymi procesu, takimi jak składowe siły szlifowania, parametry chropowatości szlifowanych powierzchni oraz naprężenia własne w warstwie wierzchniej próbek poddanych obróbce.

Przeprowadzona analiza zmian sygnału EA, uwzględniająca jedynie podstawowy parametr impulsów EA związany z przenoszoną przez nie energią (wartość skuteczna), nie wykazała jednoznacznej korelacji z postępującym zużyciem ściernicy, a szczególnie z momentem całkowitej utraty zdolności skrawnej ściernic. W wartościach parametru EA_{RMS} , nie zauważono charakterystycznej zmiany w momencie utraty zdolności skrawnej (zdefiniowanej przez pojawienie się przypaleń szlifierskich). Przebiegi tego parametru nie posiadają, także globalnego ekstremum (w domyśle maksimum) na końcu analizowanego czasu pracy ściernicy lub w miejscu zarejestrowanej najniższej wartości wskaźnika zdolności skrawnej ściernic (K_{CPS}). W wyniku zaistnienia powyższych aspektów, do analizy emisji akustycznej wprowadzono kolejne czynniki w postaci parametrów statystycznych sygnału EA_{RMS} oraz w postaci właściwej energii sygnału emisji akustycznej.

W przypadku metod diagnostycznych, głównym problemem jest odpowiedni dobór wskaźników, które umożliwiłyby korelację dokonanych pomiarów i stanowiłyby optymalną charakterystykę zjawisk zachodzących w strefie szlifowania. Dlatego też, aby uzyskać bardziej wyczerpujące informacje o strukturze sygnałów EA zarejestrowanych w trakcie przebiegu procesu, zdecydowano się dokonać analizy współczynników przeznaczonych do ilościowego opisu zgodności rozkładu badanej cechy w odniesieniu do rozkładu normalnego, a informujące o:

- stopniu rozproszenia (lub koncentracji) elementów w badanych sygnałach wokół ich wartości średniej (wariancja s²),
- mierze natężenia koncentracji (skupienia) poszczególnych elementów próby wokół ich wartości średniej parametrami tymi są: moment 4. rzędu (*m*₄) oraz standaryzowany moment 4. rzędu (*K*), zwany parametrem kurtoza, *kurtosis* lub po prostu współczynni-kiem spłaszczenia (koncentracji) [Boc2003, Now1991]:

$$m_4 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(x_i - \overline{x} \right)^4, \tag{4.8.19}$$

$$K = \frac{m_4}{s^4},$$
 (4.8.20)

gdzie: n - liczność próby,

 x_i – wartość *i*-tego elementu próby,

 \overline{x} – średnia wartość elementów próby,

s – odchylenie standardowe z próby:

$$s = \sqrt{s^2} , \qquad (4.8.21)$$

gdzie: s^2 – wariancja z próby:

S

$${}^{2} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} (x_{i} - \overline{x})^{2}, \qquad (4.8.22)$$

oraz mierze asymetrii (skośności) rozkładu:

 m_3 – moment centralny 3. rzędu:

$$S_k = \frac{m_3}{s^3},$$
 (4.8.23)

gdzie:

$$m_{3} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} (x_{i} - \overline{x})^{3}.$$
(4.8.24)

W celu określenia stopnia koncentracji elementów próby wokół wartości średniej, porównuje się otrzymane rozkłady z rozkładem normalnym, który traktowany jest jako punkt odniesienia.



Rys. 4.8.36. Interpretacja geometryczna rozkładu *beta* w odniesieniu do rozkładu normalnego oraz otrzymanych wyników badań (dla $K_{\beta}(EA_{RMS}) > 0$ oraz $S_{k\beta}(EA_{RMS}) < 0$)

Zgodnie z informacjami podanymi przez [Boc2003], zakłada się, że jeżeli K < 0, to krzywa rozkładu była bardziej spłaszczona, gdy K = 0, to krzywa miła tą samą wysokość, jak krzywa normalna, a dla K > 0 – krzywa otrzymanego rozkładu była bardziej stroma.

Wariancja wartości skutecznej EA

Analiza zmian wariancji będącej podstawowym wskaźnikiem i miarą zróżnicowania próby (czyli siły jej dyspersji) dla sygnału EA_{RMS} w funkcji czasu pracy ściernic wykazała, że spadek wartości tego parametru może świadczyć o tendencji (dążeniu) do odnowienia CPS. Natomiast minima lokalne można uznać za punkty charakterystyczne, w których nastąpiło zjawisko samoostrzenia ściernic (rys. 4.8.37, \Box 171).

Na wykresach, punkty charakterystyczne dla wskaźnika zdolności skrawnej (K_{CPS}) pokrywały się z minimami lokalnymi (ewentualnie spadkiem wartości, jak w 1 przypadku) w 100% dla ściernicy o nominalnej mniejszej twardości (99A60J7V), natomiast dla ściernicy 99A60M7V zaobserwowano zgodność 34:3 punktów, co oznacza, że tylko około 8% nie spełniało powyższego założenia. Dowodzi to istnienia prawidłowości, która określa, że nawet

w przypadku twardej ściernicy pracującej z prędkością posuwu $v_{ft} = 24$ m/min, pomimo innego rodzaju trendu zmian EA, wariancja utrzymała tendencję do obniżania swoich wartości w punktach samoodnowień ściernicy, a zjawisko samoostrzenia pokryło się ze wzrostem wariancji EA_{RMS} .



Rys. 4.8.37. Zmiany wariancji $s^2(EA_{RMS})$ w analizowanych warunkach i okresie czasu pracy badanych ściernic

Z powyższego można wywnioskować, że wariancja jest ściślej powiązana z wytrzymałościowym charakterem pracy ściernicy, niż ze ściernym, dla którego w sygnale EA przewagę zdobywają fale sprężyste pochodzące od strony materiału obrabianego. Ponadto, w przebiegach wariancji wartości skutecznej emisji akustycznej, można wyróżnić dwa charakterystyczne etapy: szybki spadek wartości w początkowym okresie czasu pracy ściernicy oraz umiarkowany wzrost wartości wariancji po przekroczeniu określonego punktu czasu pracy ściernicy. Istnienie tych dwóch obszarów można wytłumaczyć dynamicznymi zmianami topografii CPS, które zachodzą na początku pracy ściernicy, a które wynikają z pękania i wyrywania ziaren z powierzchni narzędzia o naruszonej strukturze (poprzez proces obciągania) oraz tych ziaren, które były najsłabiej utrzymywane. Po tym okresie kontaktu ściernicy z materiałem, następował bardziej ustabilizowany proces zużywania.

Moment centralny 4. rzędu

Analiza przebiegu momentu 4. rzędu (m_4), który świadczy o mierze natężenia koncentracji (skupienia) poszczególnych elementów próby wokół ich wartości średniej, wykazała, że parametr ten jest mało czułym wskaźnikiem zdolności skrawnej. Lokalne minima, w większości przypadków, pokryły się z punktami charakterystycznymi geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej (K_{CPS}), ale korelacja ta zatarta jest przez wyraźną tendencję spadku wartości $m_4(EA_{RMS})$ w funkcji czasu pracy ściernic (rys. 4.8.38, \Box 172).



Rys. 4.8.38. Zmiany centralnego momentu 4. rzędu $m_4(EA_{RMS})$ w analizowanych warunkach i okresie czasu pracy badanych ściernic (*verte* •)

Ponadto, omawiany wskaźnik charakteryzował się względnie dużym spadkiem wartości w początkowej fazie szlifowania (nowo obciągniętą ściernicą), po czym jego zmiany stabilizowały się na określonym poziomie, znacznie niższym od wartości początkowej. Można uznać, że $m_4(EA_{RMS})$ dąży do quasi-statycznej wartości, wokół której oscyluje przez resztę rozpatrywanego okresu trwałości narzędzia. Takie zachowanie omawianego współczynnika wiąże się z brakiem minimum globalnego w momencie całkowitej utraty zdolności skrawnej ściernicy, co oznacza bardzo ograniczone zastosowanie $m_4(EA_{RMS})$ do analizy stanu CPS poprzez rejestrację sygnału EA.

Rys. 4.8.38. (ciąg dalszy)



Współczynnik spłaszczenia

W przeprowadzonych badaniach zaobserwowano konsekwentny spadek wartości współczynnika spłaszczenia (kurtoza) emisji akustycznej $K(EA_{RMS})$ w funkcji czasu szlifowania. Pomimo wyraźnej tendencji malejącej, opisywany współczynnik spłaszczenia nie charakteryzował się wysokim stopniem korelacji ze zmniejszającą się zdolnością skrawną ściernic, a w szczególności z punktami samoostrzenia (rys. 4.8.39, \Box 173).



Rys. 4.8.39. Zmiany współczynnika spłaszczenia $K(EA_{RMS})$ w analizowanych warunkach i okresie czasu pracy badanych ściernic

(verte *)

Analiza usytuowania punktów odnowień czynnej powierzchni ściernic pozwoliła stwierdzić, że w większości przypadków dla ściernicy o nominalnej twardości J oraz M, punkty charakterystyczne dla odnowień ściernicy pobrane z wykresu zmienności wskaźnika K_{CPS} pokrywały się (około 64% dla 99A60J7V i około 86% dla 99A60M7V) ze wzrostami wartości współczynnika $K(EA_{RMS})$. Tabele zawierające szczegółowe porównanie procentowej zgodności zamieszczono w załączniku do pracy (rozdz. Z.4.3).



Rys. 4.8.39. (ciąg dalszy)

Kształtowanie się wartości omawianego wskaźnika w obszarze wartości dodatnich (K > 0), oznacza, że we wszystkich badanych przypadkach i w każdym punkcie pomiarowym krzywa rozkładu sygnału EA_{RMS} była bardziej skupiona w porównaniu do rozkładu normalnego. Ponadto, wraz z postępującą utratą zdolności skrawnej przez ściernice, wartości $K(EA_{RMS})$ malały w kierunku wartości zerowej, co oznacza, że rozkład dążył do rozkładu normalnego. Oznacza to, że w przypadku badania zgodności rozkładu wartości $K(EA_{RMS})$ z rozkładem normalnym, wartości współczynnika spłaszczenia zbliżają do rozkładu normalnego wraz z postępującym zużyciem ściernicy.

Współczynnik spłaszczenia okazał się mało przydatny do oceny okresu trwałości ściernic. Wzrost tego współczynnika następował nie tylko w momentach zwiększania się geometrycznych zdolności starawych ziaren ściernicy. Nie osiągał też swojego minimum globalnego w momencie całkowitej utraty zdolności skrawnej ściernicy, wyznaczonej poprzez pojawienie się przypaleń szlifierskich na powierzchni przedmiotu obrabianego. Przeciwko temu współczynnikowi przemawia, także znacznie odbiegający charakter zmian w przypadku twardej ściernicy (99A60M7V) pracującej z najwyższym posuwem stycznym stołu ($v_{fl} = 24$ m/min), czyli w najbardziej dynamicznych warunkach, jakie analizowano. Aż 7 na 19 (co stanowi około 36%) punktów reprezentujących punkty samoostrzenia, cechowało się odmiennym zachowaniem, z uwagi na zarejestrowanie spadku wartości *K*(*EA*_{RMS}).

Powyższe fakty dyskwalifikują omawiany parametr, jako optymalny parametr do wykorzystania w szczegółowej ocenie zużycia ściernic. Jednakże współczynnik ten w ogólnej formie zgodny jest z tendencją tępienia ściernicy – jest monotonicznie malejący w funkcji czasu szlifowania.

Ponieważ współczynnik asymetrii profilu (S_k) określa kierunek i wartość przesunięcia, a parametr kurtoza (K) określa stopień jego rozmycia, to parametry te mogą posłużyć do identyfikacji sposobu obróbki. Jednakże do aproksymacji rozkładów statystycznych stosowany może być z większą skutecznością rozkład *beta* (β), który dopasowuje się do różnych kształtów rozkładów empirycznych [Now1991].

Rozkład ten opisuje równanie:

$$\beta(\mathbf{a},\mathbf{b}) = \int_{0}^{1} y^{a-1} \cdot (1-y)^{b-1} \cdot dy, \qquad (4.8.25)$$

$$a = \frac{\overline{y}}{\sigma^2} \cdot \left(\overline{y} - \overline{y}^2 - \sigma^2\right), \tag{4.8.26}$$

$$b = \frac{1 - \overline{y}}{\sigma^2} \cdot \left(\overline{y} - \overline{y}^2 - \sigma^2\right), \tag{4.8.27}$$

gdzie:

a i b – to parametry rozkładu *beta*, σ – odchylenie standardowe.

Między parametrami (a, b) rozkładu *beta*, a współczynnikiem $(S_{k\beta})$ oraz (K_{β}) zachodzą poniższe związki [Now1991]:

$$S_{k\beta} = \frac{2 \cdot (b-a)}{a+b+2} \cdot \left(\frac{a+b+1}{a \cdot b}\right)^{1/2},$$
(4.8.28)

$$K_{\beta} = \frac{6 \cdot (a-b)^{2} \cdot (a+b+1) - a \cdot b \cdot (a+b+2)}{a \cdot b \cdot (a+b+3) \cdot (a+b+2)}.$$
(4.8.29)

Porównanie metod wykorzystywanych do opisu rozkładów empirycznych za pomocą parametrów S_k i K oraz dla rozkładu *beta* $S_{k\beta}$ i K_{β} , przeprowadzone przez Whitehose'a [Nar1969, TN1986], a zestawione w pracy [Now1991], wykazało, że:

- parametry S_k i K są niezależne statystycznie oraz odznaczają się czułością na przypadkowo występujące duże ekstrema lokalne w profilu,
- rozkład *beta* (β) opisany jest niezależnymi parametrami, z których jeden jest związany ze wzniesieniami profilu, a drugi z wgłębieniami, ponadto parametry rozkładu *beta* są mniej czułe na przypadkowe, duże odchylenia rzędnych profilu.

Powyższe aspekty dały podstawy do postawienia hipotezy, która mówi, że analiza parametrów rozkładu *beta* ($S_{k\beta}$ i K_{β}) może posłużyć do identyfikacji charakteru pracy ściernicy, a tym samym formy jej zużycia poprzez analizę kształtu rozkładu, jaki tworzą rzędne profilu przebiegu zarejestrowanego sygnału EA. Poniżej dokonano weryfikacji niniejszego założenia.

Współczynnik kurtoza rozkładu beta

W przeprowadzonych badaniach zaobserwowano konsekwentny wzrost wartości współczynnika koncentracji sygnału dla rozkładu *beta* $K_{\beta}(EA_{RMS})$ w funkcji czasu pracy ściernicy (rys. 4.8.40, \Box 176). Analiza usytuowania punktów odnowień ściernicy, pozwoliła stwierdzić, że w większości przypadków, punkty charakterystyczne dla odnowień ściernicy pobrane z wykresu zmienności wskaźnika K_{CPS} pokrywały się (około 85% dla 99A60J7V i około 86% dla 99A60M7V) ze spadkami wartości współczynnika $K_{\beta}(EA_{RMS})$. Zestawienie ilościowe pokrycia punktów samoostrzenia ze spadkami oraz wzrostami parametru $K_{\beta}(EA_{RMS})$ przedstawiono w załączniku (rozdz. Z.4.3).



Rys. 4.8.40. Zmiany współczynnika koncentracji rozkładu *beta* $K_{\beta}(EA_{RMS})$ w analizowanych warunkach i okresie czasu pracy badanych ściernic

Ściernica twarda (99A60M7V) ponownie wykazała swój odmienny charakter pracy. Dla prędkości posuwu stycznego stołu szlifierki $v_{ft} = 14$ oraz 24 m/min, zaobserwowano kilka punktów odstających od reszty. Zmiana parametru $K_{\beta}(EA_{RMS})$ w momencie odnowienia miała przeciwny kierunek w 3 punktach pomiarowych na 17 dla posuwu $v_{ft} = 14$ m/min (17%) oraz 6 punktach na 19 dla posuwu o najwyższej wartości (31%). Jednakże, analiza współczynnika koncentracji wykazała, że jest to najbardziej korzystny parametr, który można zastosować do opisu zmian związanych ze zużyciem ściernicy. Wynika to z faktu jego wysokiej korelacji z geometrycznym wskaźnikiem zdolności skrawnej (K_{CPS}). Ponadto, współczynnik $K_{\beta}(EA_{RMS})$ posiada najmniejszą wartość na początku pracy ściernicy (zaraz po jej naostrzeniu w procesie

tzw. obciągania), a największą na końcu okresu trwałości narzędzia, wyznaczając tym samym moment, w którym CPS nie nadaje się do dalszej eksploatacji (tab. 4.8.24, D177).

Poniżej zamieszczono wykresy przedstawiające średnie zmiany wartości $K_{\beta}(EA_{RMS})$, jakie zarejestrowano w trakcie badań eksperymentalnych. Wyznaczone linie trendu poparto szczegółową analizą statystyczną.





 $(\textit{verte} \bullet)$

Tab. 4.8.24. (ciąg dalszy)

T1-250x32x98-99A60J7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5 \text{ [m/s]}, a_e = 0,03 \text{ [mm]}, v_{ft} = \{4, 14, 24\} \text{ [m/min]},$ $f_a = 0,3 \text{ [mm/skok]}, Q_c = 3 \times 10^{-3} \text{ [m^3min^{-1}]}$				T1-250x32x98-99A60M7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27.5 \text{ [m/s]}, a_e = 0.03 \text{ [mm]}, v_{ft} = \{4, 14, 24\} \text{ [m/min]},$ $f_a = 0.3 \text{ [mm/skok]}, Q_c = 3 \times 10^{-3} \text{ [m}^3 \text{min}^{-1}]$			
			$v_{ft} = 24$	[m/min]			
$K_{\beta}(EA_{RMS}) = 1$,630846+0,07867	71· <i>t</i>		$K_{\beta}(EA_{RMS}) = -0$),000395+0,0424	92· <i>t</i>	
	współ.	t ₍₇₎	poziom p		współ.	t ₍₁₆₎	poziom p
w. wolny	1,630846	0,675612	0,520973	w. wolny	-0,000395	-0,000158	0,999876
t	0,078671	5,349313	0,001065	t	0,042492	4,740123	0,000222
$t_{kr(0,05;7)} = 2,364$	46			$t_{kr(0,05;16)} = 2,11$	99		

Na podstawie uśrednionych wartości współczynnika $K_{\beta}(EA_{RMS})$ nie można wnioskować o konkretnym przebiegu procesu, w tym głównie o punktach samoostrzenia w całym przedziale pracy ściernic, ale wyraźnie widać, że parametr ten najlepiej z dotychczas omówionych sprawdzi się w określaniu momentu całkowitej utraty zdolności skrawnej badanych ściernic. Ponadto, porównując wpływ wydajności objętościowej szlifowania Q_w , można jednoznacznie stwierdzić, że średnia wartość oraz tempo wzrostu parametru $K_{\beta}(EA_{RMS})$ z pewnością zależały od parametrów obróbki. Analizując uśrednione wartości współczynnika koncentracji rozkładu *beta* dla wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej z całego analizowanego okresu trwałości ściernicy, stwierdzono, że wyższe wartości posuwu stycznego stołu szlifierki, a za razem większa dynamika przebiegu procesu, powodowały ogólne podniesienie rejestrowanych wartości emisji akustycznej. Im większa wartość prędkości posuwu v_{ft} , tym przebiegi charakteryzowały się większym kątem nachylenia.

Oznacza to, że zwiększanie wydajności objętościowej szlifowania korzystnie wpływało na czułość tego parametru (rozpiętość jego wartości), a rozrzut rozkładu analizowanego sygnału EA znacznie szybciej malał. Rosło natomiast natężenie skupienia poszczególnych elementów składowych sygnału. Ponadto, w przypadku ściernicy o nominalnie większej twardości (99A60M7V), pracującej z posuwem $v_{ft} = 4$ m/min, doszło do bardzo szybkiego (odnośnie czasu szlifowania) zwiększenia koncentracji rozkładu impulsów sygnału emisji akustycznej.

Analizując wartości współczynnika koncentracji rozkładu *beta* dla wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej $K_{\beta}(EA_{RMS})$, dla konkretnych ściernic i dla danych warunków pracy, można z powodzeniem wyznaczyć maksimum, po osiągnięciu którego ściernicę można uznać za zużytą i należy ją wymienić lub naostrzyć jej czynną powierzchnię. Poniżej zaprezentowano proponowane przez autora niniejszej rozprawy wartości graniczne współczynników $K_{\beta}(EA_{RMS})$ dla różnych warunków szlifowania. W tablicy 4.8.26, D180) zamieszczono wyniki analiz statystycznych oraz poszukiwane równania funkcji granicznych.

Aby określić wartości graniczne opisywanego parametru, dla każdej ściernicy i prędkości posuwu wybrano punkty o najwyższych wartościach. W przypadku, gdy najwyższy punkt nie był jednocześnie ostatnim punktem pomiarowym, uwzględniono także najwyższą wartość go poprzedzającą. Dla wybranych wartości wyznaczono równanie regresji w postaci funkcji o najlepszym dopasowaniu do danych doświadczalnych oraz obliczono ich rozproszenie w postaci odchylenia standardowego (tab. 4.8.25, D179).



Tab. 4.8.25. Wpływ prędkości posuwu stycznego stołu szlifierki (v_{fi}) na rozproszenie wartości współczynnika koncentracji rozkładu *beta* (s($K_B(EA_{RMS})$))

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

W celu dokładnego określenia maksymalnych wartości współczynnika $K_{\beta}(EA_{RMS})$ rozkładu *beta* dla rejestrowanych wartości sygnału emisji akustycznej (osiągnięcie, których mogłoby oznaczać konieczność przerwania procesu szlifowania i potrzebę odnowienia CPS), przeprowadzono kolejne analizy statystyczne, tworząc najlepiej dopasowany do danych eksperymentalnych model regresji.

Natomiast dla obliczonych wartości odchylenia standardowego wyznaczono równanie regresji w postaci wielomianu kwadratowego. Łącząc oba równania regresji otrzymano niezależne od warunków obróbki (dla dowolnego parametru v_{ft}) formuły, które pozwalają wyznaczyć wartości graniczne parametru $K_{\beta}(EA_{RMS})$ dla badanych ściernic (tab. 4.8.26, \Box 180).



Tab. 4.8.26. Wpływ prędkości posuwu stycznego stołu szlifierki (v_{ft}) na maksymalne rejestrowane wartości współczynnika koncentracji rozkładu *beta* ($K_{\beta}(EA_{RMS})$)

Porównując wartości współczynników korelacji otrzymanych dla równań, można wywnioskować, że mają one wysoką zgodność z wyznaczonymi równaniami. Ponieważ wskaźnik jakości dopasowania modelu do danych (R^2) jest wysokie, to zmienność zmiennej zależnej ($max(K_{\beta}(EA_{RMS})))$ może być objaśniona przez zmienne niezależne włączone do modelu (czyli v_{fl}). Ponadto, obliczone wartości statystyki *t-Studenta* znacznie przekraczają wartości krytyczne. Także wartości *poziomu-p* są znacznie mniejsze od przyjętej wartości poziomu istotności (dla $\alpha = 0,05$). Powyższe aspekty analizy statystycznej świadczą, że w analizowanych przypadkach nie było przesłanek do odrzucenia hipotezy o istotności wyznaczonych zależności.
	Va	wartość graniczna: <i>max(K_β(EA_{RMS}))</i>							
ściernica i warunki pracy	[m/min]	wynikająca z aproksymacji	odchylenie standardowe	po uwzględnieniu odch. stand.					
T1-250x32x98-99A60J7V-42m/s,	4	18,93759594	1,484838	17,45275794					
NC10 (60 \pm 2) HRC, $v_s = 27,5$ [m/s], $a_e = 0,03$ [mm],	14	26,0247797	3,751458	22,2733217					
$f_a = 0.3 \text{ [mm/skok]}, Q_c = 3 \times 10^{-3} \text{ [m^3min^{-1}]}$	24	35,76426281	8,485678	27,27858481					
T1-250x32x98-99A60M7V-42m/s,	4	17,42676182	1,05667	16,37009182					
NC10 (60 \pm 2) HRC, $v_s = 27,5$ [m/s], $a_e = 0,03$ [mm],	14	24,93835701	3,03871	21,89964701					
$f_a = 0.3 \text{ [mm/skok]}, Q_c = 3 \times 10^{-3} \text{ [m^3min^{-1}]}$	24	35,68773458	2,43715	33,25058458					

Tab. 4.8.27. Przykładowe wartości graniczne $K_{\beta}(EA_{RMS})$ do wyznaczenia utraty zdolności skrawnej

Z przebiegu wykresu dla ściernicy o nominalnie mniejszej twardości (99A60J7V) wynika, że punkty odzwierciedlające dane zaobserwowane w trakcie badań rozkładają się losowo wokół wyestymowanej zależności (co świadczy o jej adekwatności), jednakże punkt #13 znacznie odstaje od linii regresji, co może oznaczać, że jest to wartość obarczona błędem. Oznacza to, że analiza współczynnika koncentracji rozkładu *beta*, może z powodzeniem posłużyć do identyfikacji postępującego zużycia ściernicy poprzez analizę kształtu rozkładu *beta*, jaki tworzą rzędne zarejestrowanego sygnału EA. Im rozkład charakteryzuje się większą smukłością (w porównaniu do rozkładu normalnego), tym ściernica utraciła więcej zdolności skrawnej, a po przekroczeniu wartości granicznej (przyjętej z tab. 4.8.26, D180 lub 4.8.27, D181) można z wysokim prawdopodobieństwem uznać ją za stępioną i przerwać proces szlifowania.

Współczynnik asymetrii rozkładu beta

Analiza wyników badań odnośnie wartości współczynnika asymetrii (skośności) rozkładu *beta* dla wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej (parametr $S_{k\beta}(EA_{RMS})$) wykazała, że współczynnik ten wyraźnie, systematycznie maleje w funkcji czasu pracy ściernic (rys. 4.8.41, D181).



Rys. 4.8.41. Zmiany współczynnika asymetrii $S_{k\beta}(EA_{RMS})$ w analizowanych warunkach i okresie czasu pracy badanych ściernic

(verte •)

Rys. 4.8.41. (ciąg dalszy)



Spadek wartości $S_{k\beta}(EA_{RMS})$ jest szczególnie silny (względnie większy kąt pochylenia krzywej) na początku (ostra ściernica) i na końcu okresu trwałości narzędzia (ściernica całkowicie zużyta). Ponadto, analiza przebiegu współczynnika $S_{k\beta}(EA_{RMS})$ wykazała, że w punktach samoistnego odnawiania zdolności skrawnej zarejestrowano wzrost wartości opisywanego parametru lub ewentualnie znacząco mniejszy spadek wartości, niż ma to miejsce w punktach sąsiednich (chwilowe zahamowanie spadku).

Symetryczność rozkładu sygnału EA jest gubiona, a w punktach samoostrzenia, sygnał z powrotem dąży do symetrycznego rozkładu normalnego. Jednakże wartości nigdy nie wracają do punktu wyjściowego, co oznacza że rozkład nigdy nie "cofa się" do punktu początkowego, a tym samym ściernica nie odzyskuje pierwotnych zdolności skrawnych (porównywalnych ze ściernicą naostrzoną w zabiegu obciągania).

Ściernica o nominalnie większej twardości (99A60M7V), pracowała z odmienną formą zużycia (typu ściernego), dłużej utrzymując w swojej strukturze ziarna ścierne i bardziej wykorzystując ich potencjał skrawny, niż ściernica relatywnie miękka. Odbiło się to na odmiennym charakterze zmian sygnału EA_{RMS} , w tym na zmianach jego współczynnika asymetrii.

W przeciwieństwie do współczynnika $K_{\beta}(EA_{RMS})$, wartości współczynnika asymetrii, a w szczególności ich wartości uśrednione, wykazały, że $S_{k\beta}(EA_{RMS})$ posiada największą wartość na początku pracy ściernicy (zaraz po jej naostrzeniu w procesie obciągania), a najmniejszą na końcu okresu trwałości narzędzia, wyznaczając tym samym moment, w którym CPS nie nadaje się do dalszej eksploatacji (tab. 4.8.28, \Box 183).

T1-250x32x98 $v_s = 27,5 \text{ [m/s]}$ $f_a = 0,3 \text{ [mm/s]}$	$a_{e} = 0.03$ [mi kok], $Q_{c} = 3 \times 1$	2m/s, NC10 (6 m], $v_{ft} = \{4, 14, 14, 0^{-3} [m^3 min^{-1}]\}$	0±2) HRC, , 24} [m/min],	T1-250x32x98-99A60M7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5 \text{ [m/s]}, a_e = 0,03 \text{ [mm]}, v_{ft} = \{4, 14, 24\} \text{ [m/min]},$ $f_a = 0,3 \text{ [mm/skok]}, Q_c = 3 \times 10^{-3} \text{ [m^3min^{-1}]}$							
-1 -2 -2 -2 -3 -4 -5 -6			1000 t [s]	1 0 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1	200		$-v_{R} = 4 [m/min]$ $-v_{R} = 14 [m/min]$ $-v_{R} = 24 [m/min]$ 600 t [s]				
v_{ft} [m/min]	4	14	24	<i>v_{ft}</i> [m/min]	4	14	24				
		$S_{k\beta}(EA_{RMS})$: $f(t)$				$S_{k\beta}(EA_{RMS})$: f	(t)				
R	0,93444	0,89892	0,88140	R	0,941090	0,72188	0,81912				
R ²	0,87317	0,80805	0,77687	\mathbb{R}^2	0,885650	0,52111	0,67096				
R ² skor.	0,85505	0,79206	0,74499	R ² skor.	0,771301	0,48691	0,65039				
F _(1,7)	48,19179	n.d.	24,37193	F _(1,1)	7,745101	n.d.	n.d.				
$F_{(1,12)}$	n.d.	50,51770	n.d.	$F_{(1,14)}$	n.d.	15,23441	n.d.				
p	0,00022	0,00001	0,00168	F _(1,16)	n.d.	n.d.	32,62629				
				p	0.219607	0.00159	0.00003				
$F_{kr(1,7)} = 5,59, F_k$	$r_{(1,12)} = 4,75$			$F_{kr(1,1)} = 161, F_{kr(1,14)} = 4,60, F_{kr(1,16)} = 4,49$							
			$v_{ft} = 4$	[m/min]							
$S_{k\beta}(EA_{RMS}) = -0,$	946680-0,00193	8· <i>t</i>		$S_{k\beta}(EA_{RMS}) = -0.390585 - 0.012832 \cdot t$							
	współ.	t(7)	poziom p		współ.	ta	poziom p				
w. wolny	-0,946680	-6,09062	0,000496	w. wolny	-0,390585	-0,61331	0,649764				
t	-0.001938	-6.94203	0.000223	t	-0.012832	-2.78300	0.219607				
$t_{kr(0,05;7)} = 2,3646$	5			$t_{kr(0,05;1)} = 12,7062$							
			$v_{ft} = 14$	4 [m/min]							
$S_{k\beta}(EA_{RMS}) = -0,$	921522-0,00525	7· <i>t</i>		$S_{k\beta}(EA_{RMS}) = -1,$	47268-0,00218· <i>t</i>						
	współ.	t ₍₁₂₎	poziom p		współ.	t ₍₁₄₎	poziom p				
w. wolny	-0,921522	-4,66675	0,000545	w. wolny	-1,47268	-7,10297	0,000005				
t	-0,005257	-7,10758	0,000012	t	-0,00218	-3,90313	0,001592				
$t_{kr(0,05;12)} = 2,178$	8		• - <i>i</i>	$t_{kr(0,05;14)} = 2,144$	8						
			$v_{ft} = 24$	[m/min]							
$S_{k\beta}(EA_{RMS}) = -1,$	76366-0,00638· <i>t</i>			$S_{k\beta}(EA_{RMS}) = -1,$	27566-0,00333 <i>·t</i>						
	współ.	t ₍₇₎	poziom p		współ.	t ₍₁₆₎	poziom p				
w. wolny	-1,76366	-8,31010	0,000071	w. wolny	-1,27566	-7,84890	0,000001				
t	-0,00638	-4,93679	0,001681	t	-0,00333	-5,71194	0,000032				
$t_{kr(0,05;7)} = 2,3646$	5			$t_{kr(0,05;16)} = 2,119$	9	<u> </u>					

Tab. 4.8.28. Zmiany uśrednionych wartości współczynnika asymetrii rozkładu *beta* dla wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej w funkcji czasu pracy badanych ściernic

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Porównując wpływ wydajności objętościowej szlifowania Q_w , podobnie jak w przypadku współczynnika $K_{\beta}(EA_{RMS})$, można jednoznacznie stwierdzić, że średnia wartość oraz tempo wzrostu parametru $S_{\beta}(EA_{RMS})$, także wyraźnie zależały od parametrów obróbki. Im większa wydajność Q_w , tym otrzymane przebiegi charakteryzowały się większym (ujemnym) kątem nachylenia. Oznacza to, że zwiększanie wydajności objętościowej szlifowania ponownie korzystnie wpływało na rozpiętość rejestrowanych wartości. Ze zwiększeniem wartości posuwu stycznego stołu, wzrastała szybkość utraty symetrii poszczególnych elementów składowych sygnału EA.

Dla ściernicy o większej twardości (99A60M7V) ponownie można wyróżnić warunki pracy, w których pracowała ona odmiennie. W przypadku posuwu stycznego stołu szlifierki $v_{ft} = 4$ m/min, doszło do bardzo szybkiej utraty symetrii rozkładu sygnału emisji akustycznej.

T1-250x32x98-99A60J7V-42m/s, T1-250x32x98-99A60M7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5 \text{ [m/s]}, a_e = 0,03 \text{ [mm]},$ NC10 (60 \pm 2) HRC, $v_s = 27.5$ [m/s], $a_e = 0.03$ [mm], $f_a = 0.3 \text{ [mm/skok]}, Q_c = 3 \times 10^{-3} \text{ [m^3min^{-1}]}$ $f_a = 0.3 \text{ [mm/skok]}, Q_c = 3 \times 10^{-3} \text{ [m^3min^{-1}]}$ 1,0 0.9 0,9 0,8 0,8 0.7 **s**(**S**_{*k*_{*β*}(**EA**_{*RMS*})) 6,0,2,0,0,0 8,0,0,0,0,0} 0,7 $s(S_{k\beta}(EA_{RMS}))$ 0.6 0,5 0.4 0,3 0,2 0,2 0,1 0,1 0,0 0,0 4 12 14 16 18 20 22 24 26 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 2 6 8 10 v_{ft} [m/min] v_{ft} [m/min] Wartości średnie oraz odchylenia standardowego współczynnika Wartości średnie oraz odchylenia standardowego współczynnika asymetrii dla punktów, dla których przerwano proces szlifowania asymetrii dla punktów, dla których przerwano proces szlifowania ze względu na pojawienie się przypaleń: ze względu na pojawienie się przypaleń: v_{ft} [m/min] $\overline{S}_{k\beta}(EA_{RMS})$ $\pm s(S_{k\beta}(EA_{RMS}))$ v_{ft} [m/min] $\overline{S}_{k\beta}(EA_{RMS})$ $\pm s(S_{k\beta}(EA_{RMS}))$ -3,369492 4 -3,083871 0,0797620028 4 0.776991302 -3,573334 14 -3,915728 0.894067045 14 0.147468866 24 -4,279872 0.330979689 24 -3,633852 0.180322862 $s(S_{k\beta}(EA_{RMS})) = -0.631377 + 0.205264 \cdot v_{ft} - 0.006882 \cdot (v_{ft})^2$ $s(S_{k\beta}(EA_{RMS})) = 1,214572-0,122726 \cdot v_{ff} + 0,003318 \cdot (v_{ff})^2$ współ. poziom p współ. poziom p t₍₁₎ t(1) -355,035 563,759 -345,354 0,001793 w. wolny -0,63137 w. wolny 1,2145 0,001129 -0,122726 0,205264 699,764 0.001843 0.000910 v_{ft} v_{ft} 0,003318 -0,006882 -689,868 274,572 $(v_{ff})^2$ 0.00092 $(v_{ft})^2$ 0.002319 $s(S_{k\beta}(EA_{RMS})): f(v_{ft})$ $s(S_{k\beta}(EA_{RMS})): f(v_{ft})$ R R 0.999999 0.999998 0,999998 0,999995 R^2 R 0.999994 0 999984 R² R sko sko 245289.6 F_(2,1) 102106.2 F_(2,1) 0,001428 0,002213 p p = 200= 200 $F_{kr(2,1)}$ $F_{kr(2,1)}$ $t_{kr(0,05;1)} = 12,7062$ $t_{kr(0,05;1)} \ = 12,7062$

Tab. 4.8.29. Wpływ prędkości posuwu stycznego stołu szlifierki (v_{fi}) na rozproszenie wartości współczynnika asymetrii $S_{k\beta}(EA_{RMS})$ rozkładu *beta*

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Analogicznie do metody wykorzystanej w trakcie analizy współczynnika koncentracji rozkładu *beta*, wyznaczono wartości graniczne dla współczynnika asymetrii rozkładu *beta* wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej ($S_{k\beta}(EA_{RMS})$). Jednak ze względu na regresywny charakter zmian w domenie czasu pracy ściernic omawianego współczynnika, wartości graniczne wyznaczono na podstawie minimalnych wartości rejestrowanych w końcowym okresie zużycia ściernic.

Wyniki analiz statystycznych oraz opracowane funkcje, które mogą posłużyć do efektywnego wyznaczenia granicznych wartości parametru $S_{k\beta}(EA_{RMS})$ wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej zestawiono w tablicach: 4.8.29 (\Box 184) oraz 4.8.30 (\Box 185).

Porównując wartości współczynników korelacji otrzymanych dla równań, można wywnioskować o braku zgodności statystycznej z wyznaczonymi równaniami, szczególnie w przypadku ściernicy o nominalnej twardości M. Ujmując wyniki tylko w sensie statystycznym, zmienność zmiennej zależnej ($min(S_{k\beta}(EA_{RMS})))$ może być objaśniona przez parametr v_{ft} , tylko w przypadku ściernicy o nominalnej twardości J. Świadczą o tym wartości testu *Fishera-Snedecora* ($F > F_{kr}$) oraz otrzymana wartość *poziomu-p*, która jest mniejsza od przyjętego poziomu istotności α .



Tab. 4.8.30. Wpływ prędkości posuwu stycznego stołu szlifierki (v_{fl}) na maksymalne rejestrowane wartości współczynnika asymetrii $S_{k\beta}(EA_{RMS})$ rozkładu *beta*

(verte ♦)

Tab. 4.8.30. (*ciąg dalszy*)



Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Oznacza to, że w analizowanych przypadkach nie było przesłanek do odrzucenia hipotezy o istotności wyznaczonej zależności dla miękkiej ściernicy (99A60J7V), natomiast należy przyjąć, że dla ściernicy 99A60M7V wyznaczona zależność jest statystycznie nieistotna. Z powyższego postanowiono:

- przyjąć otrzymane równanie dla ściernicy 99A60J7V, jako adekwatne do poszukiwania wartości granicznej współczynnika $S_{k\beta}(EA_{RMS})$ dla różnych wartości prędkości posuw stycznego (v_{fl}),
- przyjąć jedynie otrzymane wartości graniczne współczynnika $S_{k\beta}(EA_{RMS})$ dla ściernicy o nominalnej twardości M bez stosowania otrzymanej funkcji do poszukiwania granicznego poziomu współczynnika asymetrii dla innych prędkości posuwu stycznego szlifierki (v_{fl}).

		wartość	graniczna: <i>min</i>	$(S_{k\beta}(EA_{RMS}))$
ściernica i warunki pracy	v _{ft} , [m/min]	wynikająca z aproksymacji	odchylenie standardowe	po uwzględnieniu odch. stand.
T1-250x32x98-99A60J7V-42m/s,	4	-2,559945437	0,079567	-2,480378437
NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5 \text{ [m/s]}, a_e = 0,03 \text{ [mm]},$	14	-2,922686484	0,893447	-2,029239484
$f_a = 0.3 \text{ [mm/skok]}, Q_c = 3 \times 10^{-3} \text{ [m^3min^{-1}]}$	24	-3,078754439	0,330927	-2,747827439
T1-250x32x98-99A60M7V-42m/s,	4	-3,258588568	0,776756	-2,481832568
NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27.5 \text{ [m/s]}, a_e = 0.03 \text{ [mm]},$	14	-3,339556774	0,146736	-3,192820774
$f_a = 0.3 \text{ [mm/skok]}, Q_c = 3 \times 10^{-3} \text{ [m^3min^{-1}]}$	24	-3,374393037	0,180316	-3,194077037

Tab. 4.8.31. Przykładowe wartości graniczne $S_{k\beta}(EA_{RMS})$ do wyznaczenia utraty zdolności skrawnej

Ponadto, analiza współczynnika $S_{k\beta}(EA_{RMS})$ wykazała, że doskonale nadaje się on, jako uzupełnienie współczynnika $K_{\beta}(EA_{RMS})$ w celu precyzyjniejszej identyfikacji postępującego zużycia ściernicy. W tym przypadku, im rozkład charakteryzował się większą asymetrią (w porównaniu do rozkładu normalnego), tym ściernica utraciła więcej zdolności skrawnej,

a po przekroczeniu wartości granicznej (tab. 4.8.31, D186) można z wysokim prawdopodobieństwem uznać ją za stępioną i przerwać proces szlifowania.

Korelacje wybranych parametrów wartości skutecznej emisji akustycznej ze zużyciem czynnej powierzchni ściernicy

W kolejnej części analiz sygnału EA przeprowadzono porównanie zmian zachodzących pomiędzy wybranymi parametrami sygnału EA_{RMS} , a geometrycznymi skutkami zużycia czynnej powierzchni ściernicy.

Tab. 4.8.32. Zmiany wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej (EA_{RMS}) w funkcji czynnej szerokości ściernicy (B_{kr}) oraz średniej długości odcinka starcia wierzchołków ziaren (l_{st})



Analiza korelacji występującej pomiędzy czynną szerokością ściernicy (B_{kr}) oraz średnią długością odcinka starcia wierzchołków ziaren (l_{st}), czyli jednymi z najważniejszych parametrów opisujących geometryczne zmiany CPS, a rejestrowanymi wartościami skutecznymi sygnału EA, wykazała brak ścisłej zależności.

Zaobserwowane symptomy, które świadczą o częściowej korelacji, były sporadyczne i nie można ich przyjąć jako reguły. Istotną informacją wynikającą z analizy otrzymanych relacji między zmiennymi, jest proporcjonalny wpływ parametrów na wartości sygnału EA_{RMS} . Im większe starcie krawędzi ściernicy (B_{kr}) lub wierzchołków ziaren (l_{st}), tym wartości impulsów emisji akustycznej przyjmowały większe wartości.

Tab. 4.8.33. Zmiany wariancji dla wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej ($s^2(EA_{RMS})$) w funkcji	
czynnej szerokości ściernicy (B_{kr}) oraz średniej długości odcinka starcia wierzchołków ziaren (l	st)



Wyniki wykazały, że znacznie większy udział w kształtowaniu ostatecznej wartości sygnału EA posiadał parametr B_{kr} (w porównaniu do starcia wierzchołków ziaren, l_{st}). Świadczy to o silniejszym wpływie zmian w skali makro na otrzymane wyniki.

Analiza skupienia wartości wokół sygnału EA_{RMS} (parametr $s^2(EA_{RMS})$) przy zmierzonej zmienności parametrów B_{kr} i l_{st} , wykazała tendencję do tworzenia się korelacji. Jednakże jakość predykcji była niska, gdyż prognozowane wartości wyjściowe otrzymanych modeli mogły wytłumaczyć 40 – 90% pierwotnej zależności. Świadczą to tym otrzymane wartości współczynnika korelacji (*R*) zgromadzone w tab. 4.8.33 (D188).

Tab. 4.8.34. Zmiany momentu 4. rzędu dla rozkładu wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej ($m_4(EA_{RMS})$) w funkcji zmian czynnej szerokości ściernicy (B_{kr}) oraz średniej długości odcinka starcia ziaren (l_{st})



Pomijając statystycznie słabe dopasowanie modeli do danych, zauważono istnienie odwrotnie proporcjonalnego wpływu zmian czynnej szerokości ściernicy (B_{kr}) na stopień rozproszenia sygnału ($s^2(EA_{RMS})$). Wpływ starcia wierzchołków ziaren był natomiast proporcjonalny względem obliczonych wartości wariancji sygnału EA. Przy czym, na podstawie analizy wartości standaryzowanych współczynników równania regresji, można przyjąć, że większy wpływ na wartości wyjściowe modelu miało starcie wierzchołków ziaren. Dlatego też, wzrost wartości wariancji sygnału EA_{RMS} może być zinterpretowany, jako zarejestrowanie zużycia ściernego ściernicy.

Znacznie lepszą jakość predykcji wykazały modele określone dla zmian parametrów geometrii CPS ze zmianami momentu 4. rzędu (tab. 4.8.34, \Box 189). W tym przypadku otrzymane równania regresji tłumaczą statystycznie zmienność sygnału EA w zakresie 40 – 60%. Oznacza to, że geometryczne zużycie CPS może być skutecznej wyznaczone przy pomocy parametru określającego stopnień koncentracji poszczególnych wartości sygnału wokół wartości średniej (parametr *s*²(*EA*_{RMS})).

W przypadku omawianego parametru statystycznego ($m_4(EA_{RMS})$), odnotowano jednoznaczny wpływ, jaki każda ze zmiennych niezależnych wniosła w predykcję zmiennej zależnej. Zmiany czynnej szerokości ściernicy (B_{kr}), w przeciwieństwie do średniej długości odcinka starcia wierzchołków ziaren (l_{st}), charakteryzowały się silniejszym wpływem, a ponadto oddziaływanie to zawsze było odwrotnie proporcjonalne. Oznacza to, że rejestrowanie coraz mniejszych wartości parametru ($m_4(EA_{RMS})$) może świadczyć o postępującym zużyciu wytrzymałościowym ściernicy.

Względnie wysoką zgodność z wybranymi parametrami geometrycznymi czynnej powierzchni ściernicy otrzymano, także dla współczynnika spłaszczenia rozkładu wartości skutecznej EA (parametr $K(EA_{RMS})$). Świadczą o tym wysokie wartości współczynników korelacji (R), wahające się w przedziale R = 0,7 - 0,9 w zależności od parametrów obróbki (tab. 4.8.35, D190). Oznacza to dobre dopasowanie równań regresji do danych doświadczalnych. Ponadto, obliczone wartości statystyki *t-Studenta* w większości przypadków przekraczały wartość krytyczną (przy przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$).



Tab. 4.8.35. Zmiany parametru kurtoza wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej ($K(EA_{RMS})$) w funkcji zmian czynnej szerokości ściernicy (B_{kr}) oraz średniej długości odcinka starcia ziaren (l_{st})



Tab. 4.8.35. (ciąg dalszy)

T1-250x32x98-	99A60J7	7V-42m/s,			T1-250x32x98-99A60M7V-42m/s,								
NC10 (60±2) H	RC, $v_s =$	27,5 [m/s],	$a_e = 0.03$ [1	nm],	NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27.5$ [m/s], $a_e = 0.03$ [mm],								
$f_a = 0.3$ [mm/sko	$ok], Q_c =$	$= 3 \times 10^{-3}$ [m]	min^{-1}		$f_a = 0.3 \text{ [mm/skok]}, Q_c = 3 \times 10^{-3} \text{ [m^3min^{-1}]}$								
			-										
				$V_{ft} = 24$									
$K(EA_{RMS})_{(l)} = 7,28$	396-0,366	$1 \cdot B_{kr} - 19,5989$	$9 \cdot l_{st}$		$K(EA_{RMS})_{(l)} = 9,5560 - 1,4115 \cdot B_{kr} - 16,3914 \cdot l_{st}$								
st.	współ.	współ.	t ₍₆₎	poziom p		st. współ. współ. t ₍₁₅₎ pozic							
w. wolny n.d	l.	7,2896	6,34129	0,000720	w. wolny	n.d.	9,5560	6,01619	0,000024				
$B_{kr(l)}$ -0,	58622	-0,3661	-2,32011	0,059440	$B_{kr(l)}$	-0,69127	-1,4115	-3,91848	0,001369				
$l_{st(1)}$ -0,	40187	-19,5989	-1,59049	0,162827	$l_{st(1)}$	-0,23988	-16,3914	-1,35981	0,193981				
$K(EA_{RMS})_{(2)} = 9,49$	924-0,401	8· <i>B_{kr}</i> -29,6578	$8 \cdot l_{st}$		$K(EA_{RMS})_{(2)} =$	= 12,77942-3,1	$2541 \cdot B_{kr} + 12$,18607· <i>l</i> _{st}					
st.	współ.	współ.	t ₍₆₎	poziom p		st. współ.	współ.	t ₍₁₅₎	poziom p				
w. wolny n.d	l.	9,4924	5,35342	0,001739	w. wolny	n.d.	12,77942	3,46656	0,003452				
$B_{kr(2)}$ -0,	43649	-0,4018	-1,53080	0,176697	$B_{kr(2)}$	-0,63069	-3,12541	-2,26911	0,038449				
$l_{st(2)}$ -0,	48278	-29,6578	-1,69314	0,141372	$l_{st(2)}$	$l_{st(2)}$ 0,085298 12,18607 0,30689 0,763148							
$K(EA_{RMS})_{(3)}=7,30$	95-0,438	$4 \cdot B_{kr} - 12,8800$	$0 \cdot l_{st}$		$K(EA_{RMS})_{(3)} = 13,6260 \cdot 1,5609 \cdot B_{kr} - 31,6041 \cdot l_{st}$								
st.	współ.	współ.	t ₍₆₎	poziom p		st. współ.	współ.	t ₍₁₅₎	poziom p				
w. wolny n.d	l.	7,3095	5,90726	0,001047	w. wolny	n.d.	13,6260	7,44817	0,000002				
$B_{kr(3)}$ -0,	74017	-0,4384	-3,08549	0,021512	$B_{kr(3)}$	-0,58178	-1,5609	-3,28553	0,005005				
$l_{st(3)}$ -0,	21450	-12,8800	-0,89420	0,405655	$l_{st(3)}$	-0,33350	-31,6041	-1,88339	0,079184				
K(EA	Arms)a:	K(EA _{BMS})	$K(EA_{R})$	ws)(3):		$K(EA_{RMS})_{(1)}$	K(EA _{PMS})	$K(EA_R)$	MS)(3):				
f(B	l_{kr}, l_{st}	$f(B_{kr}, l_{st})$	$f(B_{kr})$	l _{st})		$f(B_{kr}, l_{st})$	$f(B_{kr}, l_{st})$	$f(B_{kr})$	(l_{st})				
R 0,810	194	0,797362	0,82479	99	R	0,730203	0,578640	0,7778	5				
R^2 0,656	414	0,635786	0,68029	93	R^2	0,533196	0,334824	0,6050	7				
R^{2}_{skor} , 0,541	885	0,514381	0,57372	23	R ² _{skor}	0,470956	0,246134	0,5524	1				
F _(2.6) 5,731	440	5,236907	6,38358	31	F _(2,15)	8,566702	3,775209	11,490	59				
p 0,040	561	0,048314	0,03267	78	p	0,003300	0,046992	0,00094	4				
$F_{kr(2,6)} = 5,14 t_{kr(0,05,6)} = 2,4469$)				$F_{kr(2,15)} = 3,68 t_{kr(0,05;15)} = 2,1314$								

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Należy więc przyjąć hipotezę o istotności statystycznej dobranych współczynników, a tym samym uznać zależności $K(EA_{RMS}) = f(B_{kr}, l_{st})$ za prawdziwe. Do podobnego wniosku można dojść, analizując wartości *poziomu-p* oraz biorąc pod uwagę obliczone wartości testu *Fishera-Snedecora*, które także przekraczają wartość krytyczną.

Analiza wpływu poszczególnych współczynników równań regresji wykazała jednoznacznie, że obie zmienne (B_{kr} i l_{sl}) niekorzystnie wpływały na kształtowanie się wartości współczynnika spłaszczenia $K(EA_{RMS})$. Oznacza to, że bez względu na formę z jaką następuje zużycie narzędzia (wytrzymałościowe lub ścierne), wraz z postępującą utratą zdolności skrawnej CPS odnotowuje się zawsze wzrost wartości opisywanego parametru.

Tak jak zakładano wcześniej (\Box 175), najwyższą jakość predykcji modelu otrzymano dla parametru kurtoza rozkładu *beta* sygnału *EA_{RMS}*. O tym, że otrzymane zależności dobrze opisują związki między zmiennymi świadczą wysokie wartości współczynników korelacji, które są względnie zawsze wysokie (tab. 4.8.36, \Box 192). Odpowiedni dobór współczynników równań regresji potwierdzają wartości statystyki *t-Studenta* oraz testu *Fishera-Snedecora*, które przekraczają wartość krytyczną, dowodząc tym samym istotności statystycznej otrzymanych relacji.

Uwzględniając standaryzowane wartości współczynników, relatywnie większy wkład na wartość zmiennej zależnej ($K_{\beta}(EA_{RMS})$) miała czynna szerokość ściernicy (B_{kr}) w przypadku ściernicy o nominalnie mniejszej twardości (99A60J7V), a średnia długość odcinka starcia wierzchołków ziaren (l_{st}) dla ściernicy o nominalnie większej twardości (99A60M7V). Ponieważ ściernice pracowały z odmiennym charakterem zużycia, powyższe wyniki świadczą o tym, że zasadniczy wpływ na kształtowanie wartości parametru $K_{\beta}(EA_{RMS})$ posiada dominujące zjawisko – charakterystyczne dla danego narzędzia.

Oznacza to, że niezależnie od charakteru pracy ściernicy (a przede wszystkim formy jej zużycia), wraz z postępującą utratą zdolności skrawnej następowała większa koncentracja wartości EA_{RMS} wokół wartości średniej. W przypadku ściernicy o nominalnie mniejszej twardości (99A60J7V), funkcję nadrzędną przejmowały zmiany makrogeometryczne CPS, a w przypadku ściernicy relatywnie twardej (99A60M7V) – zmiany mikrogeometrii.

Tab. 4.8.36. Zmiany parametru koncentracji rozkładu *beta* dla wartości skutecznej sygnału EA ($K_{\beta}(EA_{RMS})$) w funkcji zmian czynnej szerokości ściernicy (B_{kr}) oraz średniej długości odcinka starcia ziaren (l_{st})



Powyższe wyniki, jak najbardziej odzwierciedlają stan faktyczny odnotowany w trakcie badań eksperymentalnych, gdyż ściernica 99A60J7V pracowała z przewagą zużycia wytrzymałościowego, więc do utraty zdolności skrawnej w jej przypadku przyczynił się głównie ubytek kolejnych ziaren ściernych. Natomiast dla ściernicy 99A60M7V odnotowano przewagę zużycia ściernego, co oznacza, że uległa ona głównie starciu wierzchołków ziaren. Oba charaktery pracy i formy zużycia idealnie odzwierciedliły się w zarejestrowanym kształcie zmienności współczynnika koncentracji.

Tab. 4.8.37. Zmiany asymetrii rozkładu wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej ($S_{k\beta}(EA_{RMS})$) w zależności od zmian czynnej szerokości ściernicy (B_{kr}) oraz średniej długości odcinka starcia wierzchołków ziaren (l_{st})

	T1 250-22-09 00 4 60 1731 42/-													
T1-250x3	2x98-99A60J	7V-42m/s,			T1-250x32x98-99A60M7V-42m/s,									
NC10 (60	± 2) HRC, $v_{a} =$	= 27.5 [m/s].	$a_{a} = 0.03$ [1	nml.	NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27.5$ [m/s], $a_e = 0.03$ [mm],									
$f_{r} = 0.3$ [r	nm/skok] 0.	$= 3 \times 10^{-3}$ [m]	³ min ⁻¹]	1,	$f_a = 0.3 \text{ [mm/skok]}, Q_c = 3 \times 10^{-3} \text{ [m^3min^{-1}]}$									
<i>Ju</i> 0,0 [1	, 2 <i>c</i>	5 10 [m]											
				$v_{ft} = 14$	[m/min]									
			O powt. 1 powt. 2 powt. 2 powt. 3 value va		C. (A)			powt.1 powt.2 powt.3	8					
				_					_					
$S_{k\beta}(EA_{RMS})_{\ell}$	(1) = -1,91342-0,	$39596 \cdot B_{kr} + 12$	2,97439· <i>l</i> _{st}		$S_{k\beta}(EA_{RMS})_{(1)}$	= -0,1179-0,4	$105 \cdot B_{kr} - 11,38$	$26 \cdot l_{st}$						
	et wenół	wenół	tur	poziom p		et wenół	wenół	tur	poziom p					
w wolny	st. wspoi.	1 01342	$\frac{l_{(11)}}{207321}$	0.062426	w wolny	st. wspoi.	0 1170	$\frac{u_{(13)}}{0.14649}$	0.885784					
w. womy	0.75652	-1,91342	-2,07321	0,002420	w. womy	11.u.	-0,1179	-0,14049	0,000711					
$D_{kr(1)}$	-0,73033	-0,39390	-4,30917	0,001119	D _{kr(l)}	-0,30338	-0,4103	-2,38330	0,022/11					
$l_{st(1)}$	0,233366	12,97439	1,34775	0,204842	$l_{st(1)}$	-0,35073	-11,3826	-1,60825	0,131/86					
$S_{k\beta}(EA_{RMS})_{\ell}$	$_{2)} = 0,031668-0$,58433∙B _{kr} -0,2	$38928 \cdot l_{st}$		$S_{k\beta}(EA_{RMS})_{(2)}$	= -0,0974-0,3	$151 \cdot B_{kr} - 10,50$	$17 \cdot l_{st}$						
	st. współ.	współ.	t ₍₁₁₎	poziom p		st. współ.	współ.	t ₍₁₃₎	poziom p					
w. wolny	n.d.	0.031668	0.07433	0.942086	w. wolny	n.d.	-0.0974 -0.18079		0.859320					
$B_{kr(2)}$	-0.92043	-0.58433	-7.55492	0.000011	$B_{kr(2)}$	-0.38720	-0.3151	-1.95886	886 0.071934					
$L_{st(2)}$	-0.01083	-0.38928	-0.08896	0.930715	$l_{st(2)}$ -0,53715 -10,5017 -2,71748 0,017597									
<i>vsi(2)</i>	0,01005	0,50720	0,00070	0,750715	• 51(2)	0,00710	10,5017	2,71710	0,017077					
$S_{k\beta}(EA_{RMS})_{\ell}$	$_{(3)} = 0,49731-0,6$	59813· <i>B</i> _{kr} -8,5	$3682 \cdot l_{st}$		$S_{k\beta}(EA_{RMS})_{(3)}$	= -1,44676+0,	$01099 \cdot B_{kr} - 9,0$	$01711 \cdot l_{st}$						
	st. współ.	współ.	t ₍₁₁₎	poziom p		st. współ.	współ.	t ₍₁₃₎	poziom p					
w. wolny	n.d.	0,49731	0,54084	0,599396	w. wolny	n.d.	-1,44676	-2,22275	0,044593					
$B_{kr(3)}$	-0,77227	-0,69813	-4,26647	0,001329	$B_{kr(3)}$	0,017902	0,01099	0,05988	0,953162					
$l_{st(3)}$	-0,18374	-8,53682	-1,01510	0,331866	$l_{st(3)}$	-0,355377	-9,01711	-1,18871	0,255816					
	. ·													
	$S_{k\beta}(EA_{RMS})_{(1)}$:	$S_{k\beta}(EA_{RMS})$	$C_{(2)}$: $S_{k\beta}(EA)$	RMS)(3):		$S_{k\beta}(EA_{RMS})_{(1)}$:	$S_{k\beta}(EA_{RMS})$	(2): $S_{k\beta}(EA)$	RMS)(3):					
	$f(B_{kr}, l_{st})$	$f(B_{kr}, l_{st})$) $f(B_k)$	r, l_{st}		$f(B_{kr}, l_{st})$	$f(B_{kr}, l_{st})$	$f(B_{kr})$	(l_{st})					
R	0,82269	0,92400	0,8000	11	R	0,625521	0,710693	0,3469	04					
R ²	0,67682	0,85377	0,6400	17	\mathbb{R}^2	0,391277	0,505085	0,1203	42					
R ² skor.	0,61806	0,82719	0,5745	66	R ² skor.	0,297627	0,428944	-0,0149	990					
F _(2,11)	11,51819	32,11287	9,7785	09	F _(2,13)	4,178091	6,633569	0,8892	36					
р	0,00200	0,00003	0,0036	27	p	0,039694	0,010338	0,4345	50					
				I										
$F_{kr(2,11)} =$	3,98				$F_{kr(2,13)} = 3$	3,81								
$t_{kr(0,05;11)} =$	2,2010				$t_{kr(0,05;13)} = 2$	2,1604								

Podobnie, jak w przypadku współczynnika koncentracji rozkładu *beta* sygnału EA_{RMS} , dla współczynnika asymetrii ($S_{k\beta}(EA_{RMS})$), także otrzymano wysoką zgodność ze zmianami czynnej szerokości ściernicy (B_{kr}) oraz średnią długością starcia wierzchołków ziaren (l_{st}) – tablica 4.8.37 (\Box 193). Jednakże, w tym przypadku wartości współczynników determinacji/korelacji były ogólnie minimalnie wyższe (poza ściernicą 99A60M7V dla prędkości posuwu wzdłużnego $v_{ft} = \{14, 24\}$ m/min). Oznacza to, że jakość dopasowania funkcji regresji do danych była większa, czyli prognozowane wartości wyjściowe dla modeli mogą być obarczone mniejszym błędem.

Analizując otrzymane relacje, stwierdzono, że postępujące zużycie ściernic, wyrażone w postaci wzrostu czynnej szerokości ściernicy (B_{kr}) lub wzrostu średniej długości odcinka starcia wierzchołków ziaren (l_{st}) przekłada się na spadek wartości współczynnika asymetrii rozkładu sygnału EA_{RMS} . Ponownie można rozróżnić relatywnie inny wkład poszczególnych współczynników w predykcję zmiennej zależnej. Ściernica pracująca z dominującym zużyciem wytrzymałościowym (99A60J7V) charakteryzowała się znacznie większym wpływem zmian w skali makrogeometrii na sygnał EA. Natomiast ściernica o nominalnie większej twardości (99A60M7V) odznaczała się większym udziałem starcia wierzchołków ziaren na kształtowanie wartości $S_{k\beta}(EA_{RMS})$.



Tab. 4.8.38 Uśrednione zmiany wartości skutecznej emisji akustycznej (EA_{RMS}) w funkcji zmian geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej (K_{CPS})

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

W celu dogłębniejszego zidentyfikowania przydatności poszczególnych parametrów statystycznych sygnału EA do oceny okresu trwałości ściernic, zdecydowano się odnieść je do

geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej (parametr K_{CPS}). W tablicach od 4.8.38 (^b) do 4.8.43 (^b194 – 200) zgromadzono wykresy reprezentujące w formie graficznej otrzymane relacje oraz ich szczegółowy opis statystyczny.

Wyniki analiz wyraźnie wykazują, że wraz z postępującą utratą zdolności skrawnej (spadek wskaźnika K_{CPS}), rejestrowano coraz większe wartości skuteczne sygnału EA. Ponadto, analiza wyników wykazała istnienie wyraźnej współzależności pomiędzy zmianami geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej, a zmianami wartości skutecznej sygnału EA. Wartości współczynników korelacji (*R*) świadczą o dobrym dopasowaniu równań regresji do danych doświadczalnych. Istotność statystyczna występująca pomiędzy zmiennymi potwierdzona została poprzez wartości statystyki *t-Studenta*, znacznie przekraczając wartość krytyczną oraz przez niskie wartości *poziomu-p*. Powyższe aspekty potwierdza, także wartość statystyki *F*, która też znacznie przekracza wartość krytyczną ($F > F_{kr}$). Jedynym przypadkiem zaprzeczającym powyższym stwierdzeniom jest ściernica o nominalnie większej twardości (99A60M7V) pracująca z największą z zastosowanych w badaniach prędkością posuwu stycznego stołu szlifierki ($v_{ft} = 24$ m/min). W tych warunkach, bardzo wysoka dynamika przebiegu procesu szlifowania spowodowała ukształtowanie się odmiennych zjawisk, które zarejestrowano w postaci kilku wartości odbiegających od pozostałych, co przełożyło się na znaczne pogorszenie jakości dopasowania modelu do danych (załącznik, rozdz. Z.4.3.1).

Otrzymane zależności potwierdzają fakt, że rejestrowanie coraz wyższych wartości energii sygnału (w postaci parametru EA_{RMS}) świadczy o coraz większej energii impulsów emisji akustycznej pochodzących ze strefy szlifowania. Wzrost ten najprawdopodobniej wynikał nie z coraz większej skrawności, jaką mogłyby charakteryzować się poszczególne ziarna ściernicy, a wręcz przeciwnie – z utraty tej zdolności. Za wzrost wartości sygnału EA_{RMS} w funkcji czasu pracy ściernic, a tym samym postępującej utraty zdolności skrawnej, odpowiadały:

- coraz większa powierzchnia kontaktu, a z tym związana większa liczba ziaren aktywnych w strefie szlifowania,
- dołączenie nowych źródeł EA, powiązanych ze zużyciem wytrzymałościowym ściernic,
- a w końcowej fazie pracy (trwałości) ściernicy, dołączenie także źródeł związanych ze zużyciem ściernicy ściernic.

Oznacza to, że w przypadku dobrej skrawności, gdy impulsy EA pochodzą głównie od odkształceń plastycznych materiału obrabianego (tworzenie wióra), to rejestrowane wartości skuteczne sygnału EA są względnie niskie, a wzrastają gdy ściernica ulega zużyciu wytrzymałościowemu lub uległa już całkowitemu zużyciu i głównie trze czynną powierzchnią o materiał obrabiany (wtedy też, może nastąpić niewielki spadek wartości EA_{RMS}).

Także w przypadku analizy wariancji wartości EA_{RMS} w poszukiwaniu relacji ze wskaźnikiem K_{CPS} odnotowano wysoką zgodność. Świadczą o tym wartości parametrów statystycznych, takich jak współczynnik determinacji i korelacji oraz wartości testów statystycznych, które przekraczają wartość krytyczną.

Wartości wyjściowe otrzymanych modeli są trudniejsze w interpretacji niż na przykład w przypadku wcześniej omawianej zależności $EA_{RMS} = f(K_{CPS})$, ponieważ otrzymane funkcje regresji można podzielić na dwie części. Wraz ze spadkiem wartości geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej (K_{CPS}) występuje najpierw spadek wartości $s^2(EA_{RMS})$, a następnie po przekroczeniu pewnej wartości granicznej, wartość $s^2(EA_{RMS})$ zaczyna ponownie rosnąć. Najwyraźniej widać tą tendencję w przypadku ściernicy 99A60J7V pracującej z prędkością posuwu $v_{ft} = 14$ m/min – tab. 4.8.39 (\Box 196).



Γab. 4.8.39. Uśrednione zmiany wariancji dla wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej ($s^2(EA_{RMS})$)
w funkcji zmian geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej (K_{CPS})

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Pierwszy okres (spadek wartości $s^2(EA_{RMS})$) można uznać za przedział czasowy, w którym ściernica pracowała najzupełniej prawidłowo – to znaczy dobrane parametry obróbki były właściwe, a ściernica zachowywała wysokie zdolności skrawne. Następnie następowało postępujące (i nieodwracalne) zużycie ściernic, w wyniku czego rejestrowano coraz większe rozproszenie impulsów EA wokół wartości średniej (wzrost parametru $s^2(EA_{RMS})$).

Szybki, a często natychmiastowy, wzrost wartości $s^2(EA_{RMS})$ następował w przypadku, gdy ściernica pracowała w nieodpowiednich warunkach. Te szczególne zjawisko miało miejsce dla ściernicy o nominalnie większej twardości (99A60M7V) pracującej przy najniższej dobranej w badaniach prędkości posuwu stycznego stołu szlifierki $v_{ft} = 4$ m/min (załącznik, rozdz. Z.4.3.1).

W przypadku analizy zmian momentu 4. rzędu dla rozkładu wartości EA_{RMS} w funkcji zmian geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej (tab. 4.8.40, \Box 197), odnotowano podobny charakter relacji, jak w przypadku interpretacji zmian wariancji $s^2(EA_{RMS})$. Jednakże otrzymane zależności dla $m_4(EA_{RMS})$ charakteryzowały się mniejszymi współczynnikami korelacji. Ponadto, interpretacja przebiegu linii trendu wydaje się być trudniejsza ze względu na znacznie mniejszy wzrost wartości $m_4(EARMS)$ w drugiej fazie pracy ściernicy, w której to ulega ona bezpowrotnemu zużyciu.

Oznacza to, że moment 4. rzędu nie odzwierciedla zmieniających się zdolności skrawnej ściernic w stopniu pozwalającym na zastąpienie nim pomiarów geometrycznych

czynnej powierzchni ściernicy. Zbyt duże nagromadzenie punktów wyjściowych otrzymanych modeli w wąskim paśmie zmienności pod koniec analizowanego czasu pracy ściernic (pomimo wysokich wartości współczynnika korelacji dla otrzymanych równań regresji) wyklucza ten parametr z grona wielkości informujących o całkowitej utracie zdolności skrawnej ściernic i wyznaczających monet, w którym ściernicę należy wymienić lub poddać zabiegowi obciągania.

Parametr kurtoza (czyli współczynnik spłaszczenia) odnoszący się do rozkładu wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej, tak jak zakładano wcześniej, cechował się wysokim stopniem korelacji ze zużyciem ściernic, wyrażonym poprzez geometryczny wskaźnik zdolności skrawnej. Bardzo duże wartości współczynnik korelacji, wynoszące we wszystkich przypadkach powyżej R > 80%, a także wartości statystyki *Fishera-Snedecora*, wykazują jednoznacznie, że wyznaczone funkcje regresji są statystycznie istotne. Potwierdzają to obliczone wartości statystyki *t-Studenta* dla współczynników równań regresji oraz ich poziomy istotności p.



Tab. 4.8.40. Uśrednione zmiany momentu 4. rzędu dla rozkładu sygnału emisji akustycznej ($m_4(EA_{RMS})$) w funkcji zmian geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej (K_{CPS})

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Z analizy przebiegu otrzymanych linii trendu wynika, że wraz z postępującą utratą zdolności skrawnej (K_{CPS}), czyli następującym zużyciem ściernic, wartości współczynnika spłaszczenia dla rozkładu wartości skutecznej EA malały. Oznacza to, że oba porównywane parametry odznaczały się tendencją spadkową w dziedzinie czasu pracy ściernicy. Z powyż-szego można wnioskować o wysokiej użyteczności parametru kurtoza w kwestii prognozo-

wania zdolności skrawnej ściernic. Ponadto, wysoka korelacja otrzymanych relacji wskazuje na możliwość zastąpienia pomiarów geometrycznych CPS poprzez pomiary EA. Tym samym, wyznaczenie parametru kurtoza z zarejestrowanego sygnału emisji akustycznej oraz dokonanie odpowiedniej interpretacji otrzymanych wartości (w oparciu określone równania regresji) z wysokim prawdopodobieństwem może zastąpić tradycyjne wyznaczanie wskaźnika K_{CPS} – do oceny chwilowego zużycia ściernicy.

Parametr kurtoza rozkładu *beta* dla rozkładu wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej ($K_{\beta}(EA_{RMS})$) w wyniku przeprowadzonych analiz, także wykazał wysoką zgodność z parametrem K_{CPS} , zbliżoną do wcześniej omawianego współczynnika spłaszczenia.

Ponieważ po raz kolejny odnotowano wysokie wartości współczynników korelacji oraz wartości statystyki *t-Studenta* i testu *Fishera-Snedecora* przekraczające wartości kry-tyczne, to otrzymane równania regresji (modele) można uznać za statystycznie istotne (tab. 4.8.42, D199).



Tab. 4.8.41. Uśrednione zmiany parametru kurtoza wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej ($K(EA_{RMS})$) w funkcji zmian geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej (K_{CPS})

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Istotną różnicą, która przemawia na korzyść parametru kurtoza rozkładu *beta*, jest zaistnienie odwrotnej relacji. Podczas, gdy następuje zużycie ściernic, wskaźnik zdolności skrawnej K_{CPS} maleje, a rejestrowane wartości parametru kurtoza rozkładu sygnału emisji akustycznej rosną (w przeciwieństwie do współczynnika spłaszczenia). Znacząco ułatwia to interpretację wyników, gdyż pod koniec okresu trwałości ściernicy, wartości $K_{\beta}(EA_{RMS})$ nie gromadzą się w niskim paśmie zmienności, a wręcz przeciwnie – zaczynają szybko rosnąć, by

przekroczyć określoną wartość graniczną (zależną od parametrów obróbki) w chwili, gdy ściernica ulega całkowitemu zużyciu i nie zachodzą już samoistne procesy odnawiania (sa-moostrzenia).

Podobnie jak w przypadku zmiennej $K(EA_{RMS})$, parametr $K_{\beta}(EA_{RMS})$ może posłużyć w prognozowaniu aktualnej/chwilowej zdolności skrawnej ściernic. W przypadku zastąpienia badań geometrii CPS poprzez pomiary $K_{\beta}(EA_{RMS})$, oprócz znaczącego skrócenia czasu pomiarów zyskuje się bardzo łatwy w interpretacji parametr ze względu na jego odwrotnie proporcjonalny przyrost wartości do zmian zdolności skrawnej.

Zbliżone wyniki, jak w przypadku współczynnika spłaszczenia ($K(EA_{RMS})$) oraz parametru kurtoza rozkładu *beta* ($K_{\beta}(EA_{RMS})$) w funkcji zmian geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej (K_{CPS}), odnotowano także w przypadku poszukiwania zależności dla współczynnika asymetrii wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej odniesionej do rozkładu *beta* ($S_{k\beta}(EA_{RMS})$).

Tab. 4.8.42. Uśrednione zmiany parametru koncentracji rozkładu *beta* dla sygnału emisji akustycznej $(K_{\beta}(EA_{RMS}))$ w funkcji zmian geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej (K_{CPS})



Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Wysokie wartości współczynników korelacji oraz istotne statystycznie równania regresji, ponownie świadczą o możliwości zastosowania omawianego parametru w ramach identyfikacji charakteru pracy i wykrywania postępującego zużycia ściernic.

W tym przypadku, wraz z utratą zdolności skrawnej (spadek wskaźnika K_{CPS}) odnotowuje się coraz mniejsze wartości współczynnika asymetrii. Jednakże, ponieważ jego wartości są zawsze ujemne ($S_{k\beta}(EA_{RMS}) < 0$), to jego wartość bezwzględna rośnie w funkcji czasu pracy ściernicy. Podobnie jak w przypadku $K_{\beta}(EA_{RMS})$, opisywany parametr nie dąży do żadnej wartości granicznej, przez co pod koniec okresu trwałości narzędzia $S_{k\beta}(EA_{RMS})$ nie posiada tendencji do gromadzenia się wokół jednej wartości, a wręcz przeciwnie – coraz bardziej oddala się od początkowego poziomu.



Tab. 4.8.43. Uśrednione zmiany współczynnika asymetrii rozkładu sygnału emisji akustycznej ($S_{k\beta}(EA_{RMS})$) w funkcji zmian geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej (K_{CPS})

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Powyższe aspekty świadczą o możliwości wykorzystania omawianego współczynnika asymetrii do analizy zmian zachodzących w strefie szlifowania i jego przydatności w prawidłowym wyznaczaniu okresu trwałości ściernicy.

Wnioski z analizy EA_{RMS} i współczynników rozkładu beta

Rozpatrując oba współczynniki rozkładu *beta* (spłaszczenie oraz asymetrię) odnośnie zmian wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej (EA_{RMS}), wyniki badań i analiz wskazują na jednoznaczne zmiany zachodzące w rozkładzie rejestrowanego sygnału w trakcie postępującego procesu zużywania CPS.

Wartości parametrów $S_{k\beta}(EA_{RMS})$ oraz $K_{\beta}(EA_{RMS})$ wykazały, że ściernica ostra (zaraz po zabiegu obciągania) daje sygnały o rozkładzie zbliżonym do normalnego, jedynie trochę przesunięte w lewo i delikatnie smuklejsze. W trakcie długotrwałego szlifowania i postępującego zużycia CPS, rozkład rejestrowanego sygnału EA oddala się coraz bardziej w lewą stronę i staje się coraz bardziej smuklejszy. W momencie, gdy ściernica ulega całkowitemu zużyciu, a jej procesy samoostrzenia nie są już na tyle efektywne, aby proces szlifowania mógł być dalej przeprowadzany, rozkład sygnału charakteryzuje się dużą wysokością (smukłością), a także jest bardzo mocno przesunięty w lewą stronę od punktu początkowego. Oznacza to, że analiza kształtu rozkładu sygnału emisji akustycznej, może być z powodzeniem wykorzystana do wyznaczania końca okresu trwałości ściernicy. Ponadto, poprzez odpowiednią interpretację zmian wartości współczynników K_{β} i S_{β} można wnioskować o kolejnych etapach utraty zdolności skrawnej CPS zachodzące w miarę upływu czasu szlifowania.

Wyniki badań wykazały proporcjonalny wpływ zmian parametrów geometrycznych czynnej powierzchni ściernicy na wartości skuteczne sygnału EA_{RMS} przy większym udziale (w kształtowaniu ostatecznej wartości sygnału EA) parametru B_{kr} (w porównaniu do starcia wierzchołków ziaren, l_{st}). Świadczy to o silniejszym wpływie zmian w skali makro na otrzymane wyniki.

Ponadto, analiza wyników wykazała istnienie relacji o bardzo wysokiej korelacji pomiędzy zmianami geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej CPS, a zmianami wartości skutecznej EA. Jedynym przypadkiem zaprzeczającym powyższym stwierdzeniom była ściernica o nominalnie większej twardości (99A60M7V) pracująca z największą z zastosowanych w badaniach prędkością posuwu ($v_{ft} = 24 \text{ m/min}$). W tych warunkach, bardzo wysoka dynamika przebiegu procesu szlifowania spowodowała ukształtowanie się odmiennych zjawisk, które zarejestrowano w postaci kilku wartości odbiegających od pozostałych, co przełożyło się na znaczne pogorszenie jakości dopasowania modelu do danych.

Ogólnie jednak, otrzymane zależności świadczą o tym, że rejestrowanie coraz wyższych wartości energii sygnału (w postaci parametrów EA) jest wynikiem coraz większej energii impulsów emisji akustycznej pochodzących ze strefy szlifowania. Wzrost ten Spowodowany był najprawdopodobniej nie z coraz większej skrawności, jaką mogłyby charakteryzować się poszczególne ziarna ściernicy, a wręcz przeciwnie – z utraty tej zdolności. Ostatecznie, można przyjąć, że za wzrost wartości sygnału EA_{RMS} w funkcji czasu pracy ściernic, a tym samym postępującej utraty zdolności skrawnej, odpowiadały:

- coraz większa powierzchnia kontaktu, a z tym związana większa liczba ziaren aktywnych w strefie szlifowania,
- dołączenie nowych źródeł EA, powiązanych ze zużyciem wytrzymałościowym ściernic,
- a w końcowej fazie pracy (pod koniec okresu trwałości) ściernicy, dołączenie także źródeł związanych ze zużyciem ściernym ściernic.

Oznacza to, że w przypadku dobrej skrawności, gdy impulsy EA pochodzą głównie od odkształceń plastycznych materiału obrabianego (tworzenie wióra), to rejestrowane wartości skuteczne sygnału EA są względnie niskie, a wzrastają gdy ściernica ulega zużyciu wytrzymałościowemu lub uległa już całkowitemu zużyciu i zaczyna głównie trzeć czynną powierzchnią o materiał obrabiany (wtedy to może, także nastąpić niewielki spadek wartości EA_{RMS}).

Analiza stopnia koncentracji wartości wokół wartości średniej dla sygnału EA_{RMS} (parametr $s^2(EA_{RMS})$), przy zmierzonej zmienności parametrów B_{kr} i l_{st} , wykazała tendencję do tworzenia się korelacji pomiędzy tymi czynnikami. Jednakże jakość predykcji była niska. Większy wpływ na wartości wyjściowe modelu miało starcie wierzchołków ziaren, dlatego też, wzrost wartości wariancji sygnału EA_{RMS} może być zinterpretowany, jako zarejestrowanie zużycia ściernego ściernicy.

W przypadku analizy wariancji oraz momentu 4. rzędu wartości EA_{RMS} w relacji ze wskaźnikiem K_{CPS} odnotowano względnie wysoką zgodność. Odpowiednia interpretacja war-

tości wskaźnika $s^2(EA_{RMS})$ pozwala na określenie, czy dobrane parametry obróbki były właściwe, a ściernica zachowuje wysokie zdolności skrawne. Szybki, a często natychmiastowy, wzrost wartości $s^2(EA_{RMS})$ następował w przypadku, gdy ściernica pracowała w nieodpowiednich warunkach. Natomiast moment 4. rzędu nie odzwierciedla zmieniających się zdolności skrawnej ściernic w stopniu pozwalającym na zastąpienie nim pomiarów geometrycznych czynnej powierzchni ściernicy. Ponadto, analiza wyników wykazała, że zbyt duże nagromadzenie punktów wyjściowych otrzymanych modeli w wąskim paśmie zmienności pod koniec analizowanego czasu pracy ściernic (pomimo wysokich wartości współczynnika korelacji dla otrzymanych równań regresji) wyklucza oba parametr z grona wielkości informujących o całkowitej utracie zdolności skrawnej ściernic i wyznaczających monet, w którym ściernicę należy wymienić lub poddać zabiegowi obciągania.

Względnie wysoką zgodność z wybranymi parametrami geometrycznymi CPS otrzymano dla współczynnika spłaszczenia rozkładu wartości skutecznej EA ($K(EA_{RMS})$). Obie zmienne (B_{kr} i l_{st}) niekorzystnie wpływają na kształtowanie się jego wartości. Oznacza to, że bez względu na formę z jaką następuje zużycie narzędzia (wytrzymałościowe lub ścierne), wraz z postępującą utratą zdolności skrawnej czynnej powierzchni ściernicy odnotowuje się zawsze wzrost wartości opisywanego parametru. Współczynnik spłaszczenia, cechował się także wysokim stopniem korelacji ze zużyciem ściernic, wyrażonym poprzez geometryczny wskaźnik zdolności skrawnej (K_{CPS}). Oba parametry odznaczały się tendencją spadkową w dziedzinie czasu pracy ściernicy. Z powyższego można wnioskować o wysokiej użyteczności parametru kurtoza w kwestii prognozowania zdolności skrawnej ściernic. Ponadto, wysoka korelacja przebiegu obu parametrów, kolejny raz wskazuje na możliwość zastąpienia pomiarów geometrycznych CPS poprzez pomiary EA.

Najwyższą jakość dopasowania modelu do danych doświadczalnych otrzymano dla parametru kurtoza rozkładu *beta* sygnału EA_{RMS} . Niezależnie od charakteru pracy ściernicy, wraz z postępującą utratą zdolności skrawnej następowała większa koncentracja wartości EA_{RMS} wokół wartości średniej. W przypadku ściernicy o nominalnie mniejszej twardości (99A60J7V), funkcję nadrzędną przejmowały zmiany makrogeometryczne CPS, a w przypadku ściernicy relatywnie twardej (99A60M7V) – zmiany mikrogeometrii. Oba charaktery pracy i formy zużycia idealnie odzwierciedliły się w zarejestrowanym kształcie zmienności współczynnika kurtoza.

Ponadto, parametr $K_{\beta}(EA_{RMS})$ cechował się wysoką zgodnością z parametrem K_{CPS} . Zastosowanie parametru kurtoza rozkładu *beta* znacząco ułatwia interpretację wyników, gdyż pod koniec okresu trwałości ściernicy, jego wartości nie gromadzą się w niskim paśmie zmienności, a wręcz przeciwnie – zaczynają szybko rosnąć, by przekroczyć określoną wartość graniczną (zależną od parametrów obróbki) w chwili, gdy ściernica ulega całkowitemu zużyciu i nie zachodzą już samoistne procesy odnawiania (samoostrzenia). Podobnie jak w przypadku zmiennej $K(EA_{RMS})$, parametr $K_{\beta}(EA_{RMS})$ może posłużyć w prognozowaniu chwilowej zdolności skrawnej ściernic. W przypadku zastąpienia badań geometrii CPS poprzez pomiary $K_{\beta}(EA_{RMS})$, oprócz znaczącego skrócenia czasu pomiarów zyskuje się bardzo łatwy w interpretacji parametr ze względu na jego odwrotnie proporcjonalny przyrost wartości do zmian zdolności skrawnej.

Podobnie, jak w przypadku współczynnika koncentracji rozkładu *beta* sygnału EA_{RMS} , dla współczynnika asymetrii ($S_{k\beta}(EA_{RMS})$), także otrzymano wysoką zgodność z geometrycznymi parametrami czynnej powierzchni ściernicy. Analizując otrzymane relacje, stwierdzono, że postępujące zużycie ściernic, wyrażone w postaci wzrostu czynnej szerokości ściernicy (B_{kr}) lub wzrostu średniej długości odcinak starcia wierzchołków ziaren (l_{st}) przekłada się na spadek wartości współczynnika asymetrii rozkładu sygnału EA_{RMS} . Ponownie

można rozróżnić relatywnie inny wkład poszczególnych współczynników w predykcję zmiennej. Ściernica pracująca z dominującym zużyciem wytrzymałościowym (99A60J7V) charakteryzowała się większym wpływem zmian w skali makrogeometrii na sygnał EA. Natomiast ściernica o nominalnie większej twardości (99A60M7V) odznaczała się większym udziałem starcia wierzchołków ziaren na kształtowanie wartości $S_{k\beta}(EA_{RMS})$. Wyniki analiz świadczą o możliwości wykorzystania omawianego współczynnika asymetrii do analiz zmian zachodzących w strefie szlifowania i mogą być pomocne w prawidłowym wyznaczaniu okresu trwałości ściernicy.

Powyżej zgromadzone wnioski z badań jednoznacznie wykazują, że analizując jednocześnie wartości parametrów $K(EA_{RMS})$, $K_{\beta}(EA_{RMS})$ oraz $S_{k\beta}(EA_{RMS})$, co obecnie nie stanowi problemu dla systemów informatycznych, można z dużym prawdopodobieństwem określić chwilowy stan narzędzia, odnoszący się do jego zdolności skrawnej. Znajomość historii zmian tych parametrów pozwoli na dokonanie jednoznacznej oceny stopnia zużycia ściernicy, a także przewidywanie momentu, w którym ściernicę należy wymienić lub ponownie naostrzyć. Ocena taka powinna być względna i odnosić rejestrowane wartości do stanu początkowego lub wcześniej określonych wartości granicznych – ustalonych dla danych warunków przebiegu procesu szlifowania.

Analiza zmian energii sygnału EA_{RMS}

Ponieważ analizy wyników przeprowadzonych badań opierały się głównie o interpretację zmian wybranych parametrów statystycznych wartości skutecznej sygnału EA, która jest pochodną energii emitowanej w materiale w wyniku zachodzących w nim odkształceń oraz skutków zużycia ziaren ściernych, zdecydowano się przeprowadzić analizę energii EA oraz zaproponować nowy współczynnik przeznaczony do oceny energetycznej procesu zużycia ściernicy, ujmujący wartość skuteczną sygnału EA przypadającą na powierzchnię kontaktu ściernicy.

Energia EA

Wartość energii sygnału emisji akustycznej wyznaczono na podstawie mierzonej wartości skutecznej (*EA_{RMS}*) według zależności [PD1999, PliS1999]:

$$E_{EA} = \frac{\sum (EA_{RMS})^2}{R} \cdot t_k \left[\frac{\mathbf{V}^2}{\Omega} \cdot \mathbf{s} = \mathbf{V}^2 \cdot \mathbf{s} \cdot \frac{\mathbf{A}}{\mathbf{V}} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{s} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{s} = \mathbf{J} \right],$$
(4.8.30)

gdzie:

e: R – impedancja na wejściu układu pomiarowego (czujnika), t_k – czas kontaktu (rejestracji sygnałów).

Wyniki dla analizowanych ściernic i warunków ich pracy przedstawiono w postaci graficznej na poniższych wykresach (rys. 4.8.42, D204).

Analiza wyników wykazała, że w funkcji czasu pracy ściernicy, energia sygnału emisji akustycznej nie posiada bezpośredniej i klarownej korelacji ze zdolnościami skrawnymi ściernicy (wyrażonymi geometrycznym wskaźnikiem K_{CPS}). W zarejestrowanych przebiegach nie można odnaleźć konsekwencji, ani w lokalnych zmianach, ani w ogólnej tendencji zmian E_{EA} . Przyczyną takiego charakteru zmian rozpatrywanego deskryptora EA jest jego silne ukierunkowanie na intensywność zmian zachodzących w układzie *przedmiot - narzędzie*, bez dominacji źródeł impulsów ze strony z któregoś z tych elementów.

Jednakże w przebiegu (szczególnie w przypadku interpretacji wartości uśrednionych) można zauważyć poniższe aspekty:

 Zmniejszenie się wartości energii EA w funkcji czasu szlifowania następuje od mało uściślonego momentu pracy ściernicy, a czasem od samego początku (ściernica zaraz po obciągnięciu – przypadek ściernicy o twardości J, v_{ft} = 24 m/min).



Rys. 4.8.42. Zmiany energii emisji akustycznej (E_{EA}) w analizowanych warunkach i okresie czasu pracy badanych ściernic

Pierwsza faza (gdy wartości EA ↑) jest najprawdopodobniej wynikiem dużej skrawności ściernicy, która przełożyła się na znacząco intensywną obróbkę plastyczną materiału – ostre ziarna ścinają lub ewentualnie bruzdują w warstwie wierzchniej próbek. Kolejne od-kształcenia plastyczne materiału obrabianego (a także częściowo zużycie CPS) spowodo-wały kumulowanie się energii ze źródeł impulsów EA, a w konsekwencji wzrost wartości parametru *E*_{EA}. Potwierdza to zachowanie się sygnału emisji akustycznej dla ściernicy o nominalnej twardości J pracującej z prędkością posuwu v_{ft} = 24 m/min, gdzie zareje-

strowano głównie spadek wartości energii emisji akustycznej. W tym przypadku ściernica względnie najszybciej (t = 50 s) utraciła swoje wysokie zdolności skrawne i przeszła do drugiej fazy pracy, charakteryzującej się powolnym, ale systematycznym spadkiem wartości geometrycznego wskaźnika K_{CPS} .

Wpływ wydajności objętościowej szlifowania (Q_w) na średnią wartość otrzymanych wartości energii EA był odwrotnie proporcjonalny. Zwiększenie prędkości posuwu stycznego stołu szlifierki (v_{fi}) powodowało obniżenie średniego poziomu rejestrowanych energii (rys. 4.8.43, D205).



Rys. 4.8.43. Uśrednione wartości energii emisji akustycznej dla różnych warunków badań w analizowanych warunkach i okresie czasu pracy badanych ściernic

Przyczyną opisanego zachowania sygnału EA jest jego ścisły związek z czasem kontaktu ściernicy z powierzchnią przedmiotu obrabianego. Im większa prędkość stołu szlifierki, tym czas penetracji materiału (dla stałych wymiarów próbek) przez CPS był krótszy, a emitowana energia źródeł impulsów mniejsza.

Przeprowadzona analiza występowania punktów samoostrzenia (zdefiniowanych przez geometryczny wskaźnik zdolności skrawnej K_{CPS} – rozdz. 4.8.1) dla lokalnych zmian wartości E_{EA} (ich wzrost lub spadek) dała niejednoznaczne wyniki. Ze względu na charakter niesionych informacji pochodzących ze strefy szlifowania, energia EA odzwierciedlała punkty odnowienia CPS zarówno przy spadku, jak i wzroście swoich wartości (z lekką tendencją do gromadzenia się tych punktów w trakcie eskalacji wartości E_{EA}). Z powyższego, wywnioskowano, że energia EA akumulując w sobie informacje z rożnych źródeł (a przede wszystkim ze zjawisk związanych z odkształceniami plastycznymi powierzchni obrabianej oraz ze zjawisk związanych ze zużyciem ściernicy) nie nadaje się do bezpośredniego wykorzystania, jako wskaźnik chwilowych zmian zachodzących na CPS. Jednakże ogólny trend zmian E_{EA} z powodzeniem może zostać wykorzystany do globalnej oceny utraty zdolności skrawnej ściernicy.

Energia EA przypadająca na powierzchnię kontaktu

Zależności zmian składowych siły szlifowania przypadających na jednostkę powierzchni strefy szlifowania przedstawiono w poprzednim rozdziale (rozdz. 4.8.3). Przebiegi omówionych wcześniej wskaźników q_{Fc} oraz q_{Fn} charakteryzują się wyraźną tendencją malejącą. Jednakże, w celu wyeliminowania pomiarów siły szlifowania z procesu diagnostyki narzędzia, zdecydowano się opracować nowy wskaźnik energetyczny – opisujący zdolność skrawną ściernicy wartością skuteczną sygnału emisji akustycznej. Wstępne wnioski z badań, autor niniejszej rozprawy zaprezentował już w 2004 roku w artykule pod tytułem "Wykorzystanie wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej do oceny zużycia ściernicy" [SP2004]. Poniżej natomiast, przedstawiono postać zaproponowanego wskaźnika energii impulsów emisji akustycznej przypadającej na jednostkową powierzchnię kontaktu ściernicy ($B_{kr} \times l_g$) z materiałem obrabianym:

$$q_{RMS} = \frac{E_{EA}}{B_{kr} \cdot l_g} = \frac{\sum \left(EA_{RMS}\right)^2}{R_{imp.}} \cdot \frac{t_k}{B_{kr} \cdot l_g}, \left[\frac{V^2}{\Omega} \cdot \frac{s}{mm^2} = \frac{V^2}{\left(V \cdot A^{-1}\right)} \cdot \frac{s}{mm^2} = \dots \right]$$

$$= \frac{V \cdot A \cdot s}{mm^2} = \frac{W \cdot s}{mm^2} = \frac{J}{mm^2}, \qquad (4.8.31)$$

gdzie: l_g – geometryczna długość styku (strefy szlifowania):

$$l_g = \sqrt{d_s \cdot a_e} , \left[\sqrt{mm \cdot mm} = \sqrt{mm^2} = mm \right]$$
(4.8.32)

 d_s – średnica zewnętrzna ściernicy,

 a_e – styk roboczy, E_{EA} – energia emisji akustycznej, t_k – czas kontaktu (rejestracji sygnału),

R_{imp.} – impedancja na wejściu układu pomiarowego (czujnika).

Charakter zmian wskaźnika q_{RMS} dla poszczególnych ściernic i warunków obróbki w funkcji czasu szlifowania zaprezentowano na poniższych wykresach (rys. 4.8.44, \Box 206).



Rys. 4.8.44. Zmienność wskaźnika q_{RMS} w analizowanych warunkachi okresie czasu pracy badanych ściernic wraz z zaznaczonymi punktami samoostrzenia(verte *)

Rys. 4.8.44. (ciąg dalszy)



Analiza charakteru zmian wskaźnika q_{RMS} wykazała, że posiada on wyraźną tendencję malejącą w funkcji czasu pracy ściernicy. Najniższe wartości wskaźnika rejestrowane były w końcowej fazie, gdzie warunki pracy ziaren ściernych w strefie szlifowania były nieodpowiednie do zainicjowania procesu samoostrzenia CPS i pojawienia się nowych mikrowierzchołków.

Charakter spadku wartości wskaźnika energii impulsów emisji akustycznej przypadającej na jednostkową powierzchnię kontaktu ściernicy przyjmował kształt funkcji potęgowej $y = a \cdot x^b \cdot e^{cx}$ dla c < 0 i b < 0, a w przypadku ściernicy o nominalnej twardości M i $v_{ft} = 4$ m/min, postać wykładniczą $y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$ (dla a < 0) lub ewentualnie potęgową dla c < 0, 0 < b < 1.

Z przebiegu wskaźnika q_{RMS} można wnioskować o postępującym starciu narzędzia, ale nie można jednoznacznie wyróżnić punktów samoostrzenia ściernicy odpowiadającym wzrostom geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej (K_{CPS}). Pomimo odniesienia energii EA do jednostkowej powierzchni przypadającej na strefę kontaktu, a także wyraźnego podobieństwa pomiędzy przebiegiem zmiennej q_{RMS} i K_{CPS} w funkcji czasu, omawiany wskaźnik charakteryzował się brakiem zgodności odnośnie kierunku zmian swych wartości dla charakterystycznych momentów, w których zarejestrowano geometryczne, samoistne odnowienia CPS (rozdz. 4.8.1). Z przebiegu wskaźnika q_{RMS} spodziewano się, że punkty samoostrzenia zaobserwowane będą w momencie wzrostu wskaźnika energii impulsów emisji akustycznej przypadającej na jednostkową powierzchnię kontaktu ściernicy. Jednakże punkty te odzwierciedlone zostały zarówno poprzez spadek jak i wzrost wartości q_{RMS} . Powyższe aspekty eliminują wykorzystanie powyższego parametru emisji akustycznej do szczegółowej oceny przebiegu procesu szlifowania.

Jednakże, jednoznaczny ogólny charakter przebiegu zmienności q_{RMS} w funkcji czasu szlifowania, a także jego wysoka korelacja z postępującym zużyciem czynnej powierzchni ściernicy w odniesieniu do wskaźników obciążenia powierzchni jednostkowej kontaktu składowymi siły szlifowania, wskazuje, że wskaźnik energii impulsów emisji akustycznej q_{RMS} może być parametrem przyjętym w kryterium oceny utraty zdolności skrawnej ściernicy dla długotrwałego okresu szlifowania.

Ponadto, zmiany wartości wskaźnika q_{RMS} w funkcji czasu pracy ściernic, wykazały podobny charakter do wskaźników obciążenia strefy kontaktu składowymi siły szlifowania (parametry q_{Fc} i q_{Fn}). Jednakże energia emisji akustycznej rejestrowana na danej powierzchni kontaktu ściernica – przedmiot obrabiany, może posiadać znacznie większe rozproszenie

wartości dla danych punktów pomiarowych, niż w przypadku siły szlifowania. Wynika to z charakteru sygnału, a dokładnie z jego różnorodności źródeł, pochodzących w przeciwieństwie do składowych siły szlifowania, nie tylko od intensywności interakcji ziaren ściernych z powierzchnią poddaną obróbce, ale przede wszystkim od typu i ilości zmian zachodzących w strukturze CPS oraz odkształceń materiału szlifowanego.

Dlatego też, EA jest bardziej wrażliwa na zmiany w strefie szlifowania, a zaobserwowane wartości wskaźnika q_{RMS} mają lokalnie większe rozproszenie. Ponieważ omawiany wskaźnik jest ściślej powiązany ze zjawiskami zachodzącymi w strefie szlifowania, to charakteryzuje się on lepszą współzależnością ze zmianami zdolności skrawnej ($q_{RMS} = f(K_{CPS})$). Ponadto, znaczący spadek wartości lub rejestracja niskich wartości wskaźnika q_{RMS} wskazuje na zmniejszoną wydajność energetyczną źródeł EA. Za najmniej wydajne źródła EA należy uznać procesy oddziaływania sprężystego, zjawiska tarcia oraz mikrozużycie ściernicy.

Powyższe wyniki i wyciągnięte wnioski potwierdzają, że głównym źródłem sygnału EA jest strefa szlifowania, która jako źródło największych odkształceń plastycznych, stanowi znakomity obszar badań, a EA najpełniej odzwierciedla charakter pracy oraz formę zużycia narzędzia ze wszystkich analizowanych sygnałów wyjściowych procesu szlifowania.

Energia EA przypadająca na jednostkową powierzchnię kontaktu w korelacji z parametrami czynnej powierzchni ściernicy (CPS)

Poniżej zamieszczono wyniki analiz statystycznych regresji wielorakiej występującej pomiędzy energią EA przypadającą na jednostkową powierzchnię kontaktu (q_{RMS}), a geometrycznymi parametrami opisującymi CPS oraz wskaźnikiem zdolności skrawnej (K_{CPS}).

Tab. 4.8.44. Uśrednione zmiany wskaźnika energii impulsów emisji akustycznej przypadającej na jednostkową powierzchnię (q_{RMS}) w funkcji zmian czynnej szerokości ściernicy (B_{kr}) oraz średniej długości odcinka starcia wierzchołków ziaren (l_{st})



(verte •)

Analiza otrzymanych relacji oraz wyników statystycznych wykazała, że energia impulsów EA przypadająca na jednostkową powierzchnię kontaktu posiada relatywnie wysoką korelację z parametrami geometrycznymi CPS. Istotność statystyczną wyznaczonych równań potwierdzają wysokie wartości współczynników korelacji oraz wyższe od krytycznej wartości statystyki *Fishera-Snedecora* ($F > F_{kr}$). Tab. 4.8.44. (ciąg dalszy)

T1-250x32: NC10 (60± $f_a = 0,3$ [mr	x98-99A60J 2) HRC, v _s = n/skok], Q _c =	7V-42m/s, = 27,5 [m/s] = 3×10 ⁻³ [m	$a_e = 0.03 [1]^{3} \text{min}^{-1}$	mm], $v_{ft} = 14$	T1-250x32x98-99A60M7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5$ [m/s], $a_e = 0,03$ [mm], $f_a = 0,3$ [mm/skok], $Q_c = 3 \times 10^{-3}$ [m ³ min ⁻¹] [m/min]							
$q_{RMS} = 9,837$	3-1,8103·B _{kr} -1	0,5399· <i>lst</i>	tax	noziom n	$q_{RMS} = 14,50928 - 3,21970 \cdot B_{kr} - 3,72434 \cdot I_{st}$							
w. wolny	n.d.	9.8373	2.80815	0.017025	w. wolny	n.d.	14.50928	11.5875	3.17E-08			
B_{kr}	-0,85586	-1,8103	-5,53837	0,000176	B_{kr}	-0,960040	-3,21970	-12,9143	8,62E-09			
lst	-0,04167	-10,5399	-0,26968	0,792399	l _{st}	-0,021891	-3,72434	-0,2945	0,773047			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	$\begin{array}{c} & & \\ \hline & & \\ R_{MS}: f(B_{kr}, l_{sl}) \\ & & \\ 0,86591 \\ & & \\ 0,70432 \\ \hline & & \\ 16,48307 \\ & & \\ 0,00049 \\ \hline & & \\ 98 \\ 2010 \end{array}$				$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	(RMS: f(B _k r, l _{st})),96569),93256),93256),92218 39,87687 2,44407E-08 ,81 ,1604						

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Odnosząc się do wyznaczonych współczynników równań regresji, można stwierdzić, że główny wpływ na kształtowanie się wskaźnika q_{RMS} posiada parametr makrogeometrii, w tym przypadku czynna szerokość ściernicy (B_{kr}). Potwierdzają to wysokie (przekraczające wartość krytyczną) wartości testu *t-Studenta* dla parametru B_{kr} , a także wynikające z nich niskie wartości poziomu istotności *p*.

Średnia długość odcinka starcia wierzchołków ziaren (l_{st}) charakteryzuje się brakiem statystycznej istotności na wartość zmiennej zależnej (q_{RMS}). Oznacza to, że na kształtowanie się wskaźnika energii EA przypadającej na jednostkową powierzchnię kontaktu *przedmiot narzędzie*, wpływ posiadają głównie zmiany zachodzące w skali makro. Wynika to z faktu ich bezpośredniego przełożenia na wielkość wskaźnika q_{RMS} – są jego składowymi w postaci powierzchni kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym ($B_{kr} \times l_g$). Istniejąca zależność jest odwrotnie proporcjonalna, co oznacza, że rejestrowanie w trakcie procesu szlifowania malejących wartości wskaźnika energii impulsów emisji akustycznej przypadającej na jednostkową powierzchnię kontaktu (q_{RMS}) (przy założeniu niezmienności parametrów obróbki) świadczy o zwiększeniu udziału zużycia wytrzymałościowego w całkowitym zużyciu ściernicy, czyli o intensywnym wyrywaniu ziaren ze struktury ściernicy, pękaniu mostków spoiwa, co w konsekwencji prowadzi do przyrostu krawędzi zaokrąglenia CPS (parametr B_{kr}).

Analiza bezpośredniej korelacji pomiędzy zaobserwowanymi czynnikami wyjściowymi procesu szlifowania, w postaci q_{RMS} oraz K_{CPS} , wykazała zbieżność wyników. Aproksymując zależności funkcją wielomianu kwadratowego, otrzymano relatywnie wysokie współczynniki korelacji, szczególnie dla uśrednionych wartości parametrów (tab. 4.8.45, D210). Otrzymane zależności dobrze opisują związki między zmiennymi. Świadczą o tym wysokie wartości współczynników korelacji, a wartości testu *Fishera-Snedecora* ($F > F_{kr}$) potwierdzają istotność statystyczną otrzymanych relacji.

Występujące niższe wartości współczynnika korelacji dla niektórych powtórzeń eksperymentu (załącznik, rozdz. Z.4.3.2) wynikają z charakteru sygnału, a dokładnie z jego źródeł. Zarówno siła szlifowania, jak i emisja akustyczna, swoje przebiegi uzależniają nie tylko od zmian zachodzących w CPS (czyli od jej zużycia), ale także od odkształceń materiału przedmiotu obrabianego.



Tab. 4.8.45. Uśrednione zmiany wskaźnika energii impulsów emisji akustycznej przypadającej na jednostkową powierzchnię (q_{RMS}) w funkcji zmian geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej (K_{CPS})

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Chwilowa wartość sygnału EA niesie w sobie pełną informację o przebiegu procesu szlifowania, dlatego opisywany parametr nie zawsze musi być na tyle skuteczny by nadawał się bezwarunkowo do analizy zużycia ściernicy. Z drugiej jednak strony jest on doskonałym narzędziem do oceny jakościowej procesu, gdyż w przypadku prawidłowego przebiegu procesu (dobrze dobranych warunków i parametrów) poprzez spadek swojej wartości wyraźnie wykazuje, że ściernica w funkcji czasu ulega zużyciu, a proces przebiega w coraz niekorzystniejszych warunkach, szczególnie w porównaniu z charakterem zmian występujących w strefie obróbki na początku procesu szlifowania, zaraz po przeprowadzeniu zabiegu obciągania ściernicy.

Ponadto, odnosząc otrzymane wyniki do wartości obliczonych dla wskaźników obciążenia jednostkowego strefy kontaktu składowymi siły szlifowania (rozdz. 4.8.3), można wywnioskować, że emisja akustyczna w postaci wskaźnika q_{RMS} charakteryzuje się zwykle lepszą jakością dopasowania modelu do danych eksperymentalnych (tab. 4.8.46, D211). Zważywszy na fakt, że sygnał EA przenosi informacje dotyczące zarówno zmian zachodzących w materiale, jak i w narzędziu, zbliżone, a czasem nawet wyższe wartości współczynnika korelacji (R) dla wskaźnika q_{RMS} w porównaniu do wyników uzyskanych dla q_{Fc} oraz q_{Fn} w relacji ze wskaźnikiem zdolności skrawnej K_{CPS} , świadczą o jego dużej efektywności.

T1-250x32x98-99A60J7V-42m/s,											T1-250x32x98-99A60M7V-42m/s,									
NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5$ [m/s], $a_e = 0,03$ [mm],										NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5$ [m/s], $a_e = 0,03$ [mm],										
$v_{ft} = \{4, 14, 24\} \text{ [m/min]}, f_a = 0,3 \text{ [mm/skok]},$									$v_{ft} = \{$	4, 14	4, 24}	[m/min], f	a = 0,3	[mm/skok]	,					
$Q_c = 3 \times 10^{-3} [\text{m}^3 \text{min}^{-1}]$									$\dot{Q}_c = 3$	×10	$^{-3}$ [m ³	min ⁻¹]								
$q_{Fc'}$ $q_{Fn'}$ q_{RMS}												///// q	Fc'	q _{Fn} , ////// q _{RMS}						
1,0		_									_	-		1,0					1	
0.0					٦,	_		Г				1		0.0						
0,0 ي]	S	0,0						
<u>5</u> 06													i q _{Rv}	06	- 💋					
q _{En}	32	67	62	2	5	86	ø		92	5	5	-	q _{Fn}	0,0	32	81	59	19	F	. 83
b 0,4	.950	943	996	5	<u>מ</u> ו	830	,922		861	981	953	-	a q _{Fc}	0,4	- 366	976,064	963	956	838	- 154
2 dia	0	0	0		> '	0	0		0	0	0	-	Rdla		- 2	000	///			0
0,2	.											-		0,2	-					-
												-			-					
01		4				14				24				0		4	14	4 VIII VIII VIII VIII VIII VIII VIII VI	24	
					v _{ft} [n	n/mi	in]										<i>v_{ft}</i> [m/	/min]		
parametr	Ve =	4 [n	n/min	1	Ve =	= 14	[[m/	min	1	$v_{\theta} =$	24	[m/min]	parame	etr	$v_{\theta} =$	4 [m/min]	$v_{\theta} = 1$	14 [m/min]	$v_{\theta} =$	24 [m/min]
puluitoti	• <i>j</i> ,	. [5022	1	, ji		0.10		,	7 <i>Ji</i>		0.6100	Parain		• <i>ji</i>	0.00522	ν _μ .		• <i>ji</i>	
	R	0,9	0211		$\frac{R}{R^2}$	C	918	334		$\frac{K}{D^2}$	0	,86192	223		$\frac{R}{D^2}$	0,99532	R	0,96330	R	0,84079
$\Box q_{Fc}$	R^{-}	0,9	20311		$\frac{R^2}{R^2}$	0	0,843	35	4	$\frac{K^2}{D^2}$	0	,/4291	$\square q_{Fc}$		R^{-}	0,99066	R^{-}	0,92795	R^{-}	0,70694
	$R^{-}_{sk.}$	0,8	4267		$\frac{R^{-}_{sk}}{R}$		0,814	18/		$R^{-}_{sk.}$	0	,65/21			$R^{-}_{sk.}$	0,98132	$R^{-}_{sk.}$	0,91687	$R^{-}_{sk.}$	0,66/86
	$\frac{R}{R^2}$	0,9	4367		$\frac{K}{R^2}$	0	0,830	186	4	$\frac{K}{D^2}$	0	,98101	22		$\frac{R}{D^2}$	0,97857	R	0,93059	R^2	0,83870
$\square q_{Fn}$	R^{-}	0,8	54052		$\frac{R^2}{R^2}$	0	1,690	032		$\frac{R^2}{D^2}$	0	,96237	$\square q_{Fn}$		R^{-}	0,95760	R^{-}	0,86600	R^{-}	0,70342
	$R^{-}_{sk.}$	0,8	5402		$\frac{R^{-}_{sk}}{R}$		0,634	102	4	$R^{-}_{sk.}$	0	,94983			$R^{-}_{sk.}$	0,91520	$R^{-}_{sk.}$	0,84538	$R^{-}_{sk.}$	0,66388
	K D^2	0,9	2426		$\frac{K}{D^2}$		0.922	55		$\frac{\kappa}{D^2}$	0	,933/0	22		K D^2	0,00481	K D^2	0,93001	$\frac{K}{D^2}$	0,75483
$\square q_{RMS}$	R D2	0,9	12430		$\frac{K}{D^2}$		1,831	.55		$\frac{\pi}{D^2}$	0	,90933	$\swarrow q_{RMS}$		$\frac{K}{D^2}$	0,00420	R D ²	0,91511	R D ²	0,509//
	K_{sk}	0,9	1248		K^{-}_{sk}	i. U	1,824	100	L	κ _{sk.}	0	,87938			K_{sk}	-0,99160	K sk.	0,90205	K^{-}_{sk}	0,31241

Tab. 4.8.46. Porównanie współczynników korelacji *R* dla otrzymanych równań regresji $q_{Fc} = f(K_{CPS})$, $q_{Fn} = f(K_{CPS})$ oraz $q_{RMS} = f(K_{CPS})$ w przypadku rozpatrywania średnich wartości wskaźników

W przypadku zaistnienia nieprawidłowych warunków pracy narzędzia (ściernica 99A60M7V, prędkość posuwu $v_{ft} = 4$ m/min), energia EA przypadająca na jednostkową powierzchnię kontaktu traci swój trend zmian w funkcji czasu pracy ściernicy odnotowany w pozostałych przypadkach (rys. 4.8.44, 206). Odzwierciedla się to w całkowitej utracie współzależności pomiędzy energią EA, a zmianami związanymi z CPS opisanymi wskaźnikiem zdolności skrawnej (funkcja $q_{RMS} = f(K_{CPS})$). W takim przypadku odwróceniu ulega tendencja z jaką kształtowane są źródła emisji akustycznej. Dominującymi czynnikami stają się zjawiska zwiazane ze zmianami w materiale obrabianym: odkształcenia spreżyste i plastyczne, powstawanie i wzrost pęknięć oraz mikropęknięć, przemiany fazowe oraz wzajemne przemieszczanie się fragmentów badanego ośrodka połączone z tarciem. Niekorzystnie dobrane parametry obróbki do twardości ściernicy i przedmiotu spowodowały zaistnienie braku dobrej właściwości skrawnej ściernicy 99A60M7V, która szybko utraciła znaczną część ziaren, a te które pozostały uległy natychmiastowemu starciu. Ziarna ściernicy zamiast usuwać materiał, w głównej mierze tarły o powierzchnię materiału. Spowodowało to, że temperatura warstwy wierzchniej szybko przekroczyła temperaturę dopuszczalną, a na powierzchni obrabianej pojawiły się przypalenia szlifierskie. Wiekszość energii zamieniona została w ciepło zamiast w pracę skrawania, przez co na powierzchni materiału obrabianego bardzo szybko pojawiły się przypalenia szlifierskie, a okres trwałości ściernicy był bardzo krótki.

Powyższe wyniki wykazują, że zdolności skrawne ściernicy mogą być wyznaczane pośrednio – poprzez wartość energii impulsów emisji akustycznej przypadającej na jednostkową powierzchnię (q_{RMS}). Ponadto, ze względu na niższą adekwatność statystyczną występującą w przypadku składowych siły szlifowania przypadających na jednostkową powierzchnię kontaktu, to sygnał EA zyskuje na większym znaczeniu praktycznym. Różnice pomiędzy wskaźnikami obciążenia i energii EA są niewielkie, ale na tyle istotne, że nie należy ich pomijąć.

Wnioski z analizy wskaźnika energii impulsów emisji akustycznej przypadającej na jednostkową powierzchnię kontaktu

Otrzymane relacje oraz wyniki statystyczne wykazały, że energia impulsów EA przypadająca na jednostkową powierzchnię kontaktu posiada relatywnie wysoką korelację z parametrami geometrycznymi CPS w skali makro. Główny wpływ na kształtowanie się wskaźnika q_{RMS} posiadał parametr określający czynną szerokość ściernicy (B_{kr}), co wynikło z faktu jego bezpośredniego udziału w kształtowaniu wskaźnika: q_{RMS} .

Analiza bezpośredniej korelacji pomiędzy czynnikami wyjściowymi procesu szlifowania, w postaci q_{RMS} oraz geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej K_{CPS} , wykazała zbieżność wyników. Parametr reprezentujący energię impulsów emisji akustycznej przypadającą na jednostkową powierzchnię kontaktu może być efektywnym narzędziem do oceny jakościowej procesu, gdyż w przypadku prawidłowego przebiegu procesu obróbki (przy dobrze dobranych warunkach i parametrach) wykazuje, że ściernica w funkcji czasu ulega zużyciu, a proces przebiega w coraz niekorzystniejszych warunkach.

Ponadto, odniesienie otrzymanych wyników do wartości obliczonych dla wskaźników obciążenia jednostkowego strefy kontaktu składowymi siły szlifowania, wykazało, że emisja akustyczna w postaci wskaźnika q_{RMS} charakteryzuje się lepszą jakością dopasowania modelu do danych eksperymentalnych. Oznacza to, że chwilowa ocena zdolności skrawnej ściernicy, a tym samym wyznaczenie końca okresu trwałości narzędzia, może zostać precyzyjniej wykonane poprzez analizę i interpretację parametrów statystycznych EA, niż za pomocą innych czynników wyjściowych procesu.

Wnioski wyciągnięte z analizy wykonanych badań eksperymentalnych, wskazują na prawdziwość hipotezy postawionej w tezie pracy. Otrzymane wyniki potwierdziły, że sygnał emisji akustycznej niesie bezpośrednie informacje o zjawiskach zachodzących w strefie szlifowania i stanowi ich miarę ilościową. Zawiera on, także większą ilość informacji o procesie, niż inne wielkości (siła, moc) charakteryzujące przebieg szlifowania.

Dotychczas, udowodniono także, że efektywnie określa zdolności skrawne ściernicy oraz z powodzeniem może posłużyć do dokładnego wyznaczania okresu trwałości narzędzia, zastępując w wielu przypadkach najdokładniejszy (i najbardziej pracochłonny) sposób opisu zdolności skrawnej, czyli pomiary mikro- i makrogeometrii CPS.

Korelacje sygnału EA z parametrami mikrogeometrii powierzchni przedmiotów szlifowanych

W niniejszym podrozdziale zaprezentowano wyniki analiz relacji występujących pomiędzy wybranymi parametrami opisującymi cechy wysokościowe (średnia arytmetyczna rzędnych - $R_{a(w)}$) i wzdłużne (średni odstęp miejscowych wzniesień - $RS_{m(w)}$) profilu chropowatości powierzchni próbek, a parametrami statystycznymi zarejestrowanego sygnału emisji akustycznej.

Wyniki badań, co zaprezentowano i omówiono poniżej, wykazały, że sygnał EA z uwagi na swoje właściwości, a szczególnie na źródła jego pochodzenia, stanowi parametr o wysoce selektywnej (szczególnie zależnej od dobranych warunków pracy narzędzia) przydatności w dziedzinie przewidywania wynikowej geometrii powierzchni poddanej procesowi szlifowania.

Zmiany mikrogeometryczne powierzchni obrabianych, zarejestrowane w funkcji czasu pracy ściernicy, charakteryzowały się znacznym rozrzutem wartości w lokalnych punktach pomiarowych, przez co powiązanie ich ze zmianami innych czynników wyjściowych procesu okazało się skomplikowane, a często niemożliwe. W tych warunkach, niektóre parametry statystyczne opisujące wartość skuteczną sygnału emisji akustycznej (EA_{RMS}) wykazały relatywnie wysoką korelację ze zamianami średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości powierzchni próbek ($R_{a(w)}$) i średnim odstępem miejscowych wzniesień ($RS_{m(w)}$). Jednakże, zależnie od prędkości posuwu, wyznaczone relacje charakteryzowały się różną jakością predykcji, co odzwierciedliło się w otrzymanych wartościach współczynników determinacji. Ponadto, zauważono znacznie niższą jakości odwzorowania danych doświadczalnych w przypadku modeli dla ściernicy o nominalnie większej twardości (99A60M7V). Wyniki badań ujęte w tablicach zaprezentowanych w niniejszym podrozdziale charakteryzują się najlepszymi korelacjami, osiągniętymi w wyniku analizy statystycznej. Pozostałe rezultaty badań zamieszczono w załączniku (rozdz. Z.4.3.3).



Tab. 4.8.47. Zmiany średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości powierzchni próbek ($R_{a(w)}$) w funkcji wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej (EA_{RMS})

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności α = 0,05.

Wyniki badań wykazały różne kształtowanie się wartości EA_{RMS} w odniesieniu do otrzymanych w efekcie końcowym chropowatości przedmiotu (w postaci parametru $R_{a(w)}$). Wysokie wartości średniej arytmetycznej rzędnych profilu, czyli uogólniając jego wysokość, otrzymano wówczas, gdy w trakcie badań zarejestrowano relatywnie niższe wartości EA_{RMS} . Odwrotna sytuacja miała miejsce w przypadku rejestrowania wysokich wartości skutecznych sygnału EA – wtedy to otrzymywano zdecydowanie niższą chropowatość powierzchni obrabianych. Oznacza to, że w trakcie sterowania obróbką szlifowaniem, w celu zapewnienia niskich chropowatości przedmiotu, należałoby optymalizować przebieg procesu pod kątem rejestrowania względnie wysokich wartości (EA_{RMS}). Jednakże, jak wykazano wcześniej, wzrosty wartości tego parametru sugerują postępujące zużycie ściernicy. Z analizy wyników można wstępnie określić, że gwarancją otrzymania niskiej chropowatości jest przeprowadzanie procesu szlifowania, częściowo zużytą ściernicą, w którym rejestrowana wartość $EA_{RMS} \ge 1,0$ V (szczególnie dla ściernicy o nominalnie niższej twardości (99A60J7V)).

Analiza stopnia rozproszenia poszczególnych elementów w badanym sygnale emisji akustycznej (parametr $s^2(EA_{RMS})$) w odniesieniu do otrzymanych chropowatości powierzchni przedmiotu ($R_{a(w)}$) nie wykazała istotnych korelacji (tab. 4.8.48, \Box 214). Pomimo, że niektóre z wyznaczonych równań regresji posiadały znamiona istnienia zależności pomiędzy zmiennymi (przez względnie wysokie wartości R i R^2), to należy uznać je za statystycznie nieistotne. Ponadto, wyznaczone linie trendu cechują się brakiem konsekwencji kierunku zmian dla różnych warunków pracy.



Tab. 4.8.48. Zmiany średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości powierzchni próbek ($R_{a(w)}$) w funkcji wariancji wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej ($s^2(EA_{RMS})$)

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności α = 0,05.

Powyższe aspekty świadczą o konieczności odrzucenia hipotezy (przynajmniej dla zakresu, w którym przeprowadzono badania) mówiącej o przydatności rozpatrywanego parametru statystycznego EA do przewidywania mikrogeometrycznych zmian zachodzących na powierzchni materiału szlifowanego.





Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Podobnie wyniki uzyskano w trakcie analizy momentu 4. rzędu dla rozkładu sygnału emisji akustycznej (parametr $m_4(EA_{RMS})$). Zmienna ta okazała się mało wrażliwa na zmiany w strefie szlifowania, odnoszące się do zamian średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości powierzchni próbek ($R_{a(w)}$).

Zarejestrowane wartości omawianego parametru skupiły się głównie w wąskim paśmie zmienności. Oznacza to, że miara natężenia (skupienia) poszczególnych elementów sygnału emisji akustycznej wokół wartości średniej jest parametrem o niskim znaczeniu użytkowym w odniesieniu do możliwości przewidywania mikrogeometrycznych wyników procesu szlifowania.

Kolejnym parametrem poddanym analizie był współczynnik koncentracji $K(EA_{RMS})$, który dalszej części rozwinięto do postaci parametru kurtoza rozkładu *beta*.

Współczynnik spłaszczenia rozkładu, wykazał istnienie wysokiej korelacji (wyrażonej względnie wysokimi współczynnikami determinacji) wzajemnych powiązań pomiędzy analizowanymi zamiennymi (tab. 4.8.50, D216). Dla każdych warunków obróbki, które były poddane badaniom, otrzymano proporcjonalne zależności między czynnikami. Wraz ze wzrostem spłaszczenia rozkładu sygnału EA_{RMS} rejestrowanego w trakcie eksperymentów, w końcowym rezultacie otrzymano większe wartości średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości szlifowanych powierzchni próbek.





Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Wraz ze wzrostem spłaszczenia rozkładu sygnały EA, rośnie prawdopodobieństwo, że zarejestrowana wartość EA_{RMS} będzie się różnić od wartości średniej. Oznacza to, że tylko w przypadku niskiego rozproszenia sygnału, wyrażonego poprzez niską wartość współczynnika spłaszczenia ($K(EA_{RMS})$), prawdopodobieństwo otrzymania na wyjściu procesu powierzchni o relatywnie niskiej chropowatości jest wysokie. Tym samym, współczynnik spłaszczenia jest kolejnym elementem, który należałoby analizować i pośrednio wpływać na jego wielkość w systemie sterowania i nadzorowania przebiegu procesu szlifowania. Im będzie on niższy, tym wzrośnie prawdopodobieństwo otrzymania powierzchni o lepszej jakości.

Zależność parametru $R_{a(w)}$ do zmian, rejestrowanego w trakcie przebiegu procesu, współczynnika koncentracji rozkładu *beta* dla sygnału EA_{RMS} była wyraźna i charakteryzowała się relatywnie wysokimi wartościami współczynnika determinacji (tab. 4.8.51, D217).

Linie trendu, w przeciwieństwie do omawianej wcześniej relacji $R_{a(w)} = f(K(EA_{RMS}))$, charakteryzowały się odwrotną proporcjonalnością pomiędzy zmiennymi. Wzrost współczynnika $K_{\beta}(EA_{RMS})$, który następował wraz z utratą zdolności skrawnej, prawie zawsze przekładał się na spadek zmierzonych po szlifowaniu wysokościowych cech chropowatości powierzchni próbek (wyrażonych parametrem $R_{a(w)}$).

Oznacza to, że w celu otrzymania najbardziej gładkich powierzchni po szlifowaniu, należałoby pracować ściernicą, która daje względnie wysokie wartości współczynnika kon-
centracji rozkładu *beta* sygnału emisji akustycznej. Jednak z powodu wzrostu tego parametru w trakcie postępującego zużycia ściernic, należy unikać przekroczenia granicznych wartości (określonych funkcją $max(K_{\beta}(EA_{RMS}))$ – rozdz. 4.8.4, D179), gdyż mogłoby to spowodować szlifowanie ściernicą o startych ziarnach i przełożyć się na niekorzystne kształtowanie się innych cech warstwy wierzchniej po obróbce (np. naprężenia).

T1-250x32x98-99A60J7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5$ [m/s], $a_e = 0,03$ [mm], $f_a = 0,3$ [mm/skok], $Q_c = 3 \times 10^{-3}$ [m ³ min ⁻¹]	T1-250x32x98-99A60M7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5$ [m/s], $a_e = 0,03$ [mm], $f_a = 0,3$ [mm/skok], $Q_c = 3 \times 10^{-3}$ [m ³ min ⁻¹]
$v_{ff} = 24$	[m/min]
$F_{kr(2,6)} = 5,14 \\ f_{kr(0,05,6)} = 2,4469 \\ f_{kr(0,05,6)} = 2,44$	$R_{a(w)} = 0,285536-0,011401 \cdot K_{\beta}(EA_{RMS}) + 0,000188 \cdot (K_{\beta}(EA_{RMS}))^2$ $R_{a(w)} = 0,285536-0,011401 \cdot K_{\beta}(EA_{RMS}) + 0,000188 \cdot (K_{\beta}(EA_{RMS}))^2$ $\frac{W Wolny}{K_{\beta}(EA_{RMS})} - 0,011401 - 2,04048 - 0,059312}{(K_{\beta}(EA_{RMS}))^2}$ $\frac{R_{a(w)}}{K_{\beta}(EA_{RMS})} = 0,000188 \cdot (K_{\beta}(EA_{RMS}))^2$ $\frac{W Wolny}{K_{\beta}(EA_{RMS})} - 0,011401 - 2,04048 - 0,059312}{(K_{\beta}(EA_{RMS}))^2}$ $\frac{R_{a(w)}}{K_{\beta}(EA_{RMS})} = 0,000188 \cdot 1,22171 - 0,240671$ $\frac{R_{a(w)}}{K_{\beta}(EA_{RMS})} = 0,000576$ $F_{kr(2,15)} = 3,68$ $t_{kr(0,05;15)} = 2,1314$

Tab. 4.8.51. Zmiany średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości powierzchni próbek ($R_{a(w)}$) w funkcji parametru kurtoza rozkładu *beta* dla wartości skutecznej sygnału EA ($K_{\beta}(EA_{RMS})$)

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Analiza wyników dotycząca określenia zależności występujących pomiędzy współczynnikiem asymetrii (skośności) rozkładu beta dla sygnału EA_{RMS} , wykazała podobne cechy jak wcześniej opisano w przypadku analizy zależności $R_{a(w)}=f(K_{\beta}(EA_{RMS}))$.

Zasadnicze różnice, które odnotowano dla opisywanego współczynnika, to: gorsze jakościowo dopasowanie modeli do danych doświadczalnych oraz odwrotny kierunek zmian, który w tym przypadku tworzy proporcjonalną zależność pomiędzy analizowanymi zależnościami (tab. 4.8.52, \Box 218). Oznacza to, że współczynnik $S_{k\beta}(EA_{RMS})$ może być wykorzystany (obok parametru $K_{\beta}(EA_{RMS})$), jako element pomocniczy w trakcie analizy sygnału emisji akustycznej w celu określania przybliżonej wartości $R_{a(w)}$.

Analiza zmian średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości powierzchni próbek ($R_{a(w)}$) w funkcji wskaźnika energii impulsów emisji akustycznej przypadającej na powierzchnię jednostkową (q_{RMS}) wykazała, że gdy zdolność skrawania (wyrażona poprzez q_{RMS}) maleje, to maleją także wartości cech wysokościowych profilu chropowatości (w omawianym przypadku – parametr $R_{a(w)}$). Wyjątek stanowi przypadek szlifowania ściernicą o nominalnie wyższej twardości (99A60M7V) pracującej z prędkością posuwu stycznego stołu szlifierki $v_{ft} = 4$ m/min. W tych warunkach, wskaźnik q_{RMS} charakteryzował się tendencją wzrostową w funkcji czasu pracy (i zużycia) ściernicy (tab. 4.8.44, D206 oraz rozdz. Z.4.3.3 w załączniku do rozprawy).



Tab. 4.8.52. Zmiany średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości powierzchni próbek ($R_{a(w)}$) w funkcji współczynnika asymetrii rozkładu *beta* dla wartości skutecznej sygnału EA ($S_{k\beta}(EA_{RMS})$)

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Ponadto, równania regresji otrzymane dla zależności $R_{a(w)}=f(q_{RMS})$ cechuje najlepsza jakość predykcji wartości wyjściowych w odniesieniu do punktów pomiarowych badań eksperymentalnych (tab. 4.8.53, [219). Powodem wysokiej zgodności w przebiegach obu czynników wyjściowych procesu jest ich charakteru zmian w funkcji czasu pracy ściernic. Posiadają one wyraźną tendencję malejącą, a najniższe wartości rejestrowane były zwykle w końcowej fazie pracy ściernicy.

Z przebiegów w funkcji czasu pracy ściernicy (q_{RMS} : rys. 4.8.44, \Box 206 oraz $R_{a(w)}$: rys. 4.8.23 – 4.8.24, \Box 120 – 121) można wnioskować o postępującym starciu narzędzia. Posiadają one też wyraźne podobieństwo do zmian wskaźnika zdolności skrawnej K_{CPS} (rozdz. 4.8.1). Ponadto, znaczący spadek wartości lub rejestrowanie niskich wartości wskaźnika q_{RMS} wskazuje na zmniejszoną wydajność energetyczną źródeł EA. Przy czym, za najmniej energetycznie wydajne źródła EA, należy uznać procesy oddziaływania sprężystego, zjawiska tarcia oraz mikrozużycie ściernicy. Aspekty te potwierdzone są poprzez zmiany parametru $R_{a(w)}$, czyli w uproszczeniu, malejącą chropowatość, która wynika ze starcia ziaren ściernych.

Znaczny rozrzut wartości lokalnych punktów pomiarowych dla wzdłużnych parametrów mikrogeometrycznych powierzchni obrabianych, przełożył się na jeszcze bardziej nieścisłe korelacje z sygnałem EA, niż miało to miejsce dla parametru $R_{a(w)}$.



Tab. 4.8.53. Zmiany średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości powierzchni próbek ($R_{a(w)}$) w funkcji energii impulsów emisji akustycznej przypadającej na powierzchnię jednostkową (q_{RMS})

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności a = 0,05.

Wyniki badań, poparte szczegółową analizą statystyczną, wykazały brak relacji pomiędzy sygnałem EA, a cechami wzdłużnymi profilu chrapowatości, wyrażonymi przez średni odstęp miejscowych wzniesień profilu powierzchni próbek ($RS_{m(w)}$) – tab. 4.8.54 (D220). Dla żadnego z parametrów statystycznych emisji akustycznej, nie udało się wyznaczyć funkcji regresji, która dobrze reprezentowałaby dane doświadczalne i była statystycznie istotna.

Sporadyczne przypadki, dla których odnotowano istotność poszczególnych współczynników równań regresji, albo wysokie wartości dopasowania danych do funkcji (w postaci współczynnika korelacji/determinacji), należy uznać za przypadkowe i niewiążące (załącznik, rozdz. Z.4.3.3).

Biorąc pod uwagę tylko powiązanie EA z parametrem $RS_{m(w)}$, sygnał EA nie stanowi dobrego odnośnika zmian mikrogeometrycznych występujących dla poszczególnych profili chropowatości powierzchni obrabianej.



Tab. 4.8.54. Zmiany średniego odstępu miejscowych wzniesień profilu chropowatości $(RS_{m(w)})$ powierzchni próbek w funkcji wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej (EA_{RMS})

Pomimo braku wiążących korelacji w sferze ogólnej, analiza wyników statystycznych regresji wykazała, że przypadkowe powiązania wystąpiły głównie dla współczynnika spłaszczenia, a także parametru kurtoza oraz skośności rozkładu *beta* dla sygnału emisji akustycznej. Oznacza to, że dla przeprowadzonych badań (w ściśle określonych warunkach i dla przyjętych ograniczeń) nie należy spodziewać się jakichkolwiek relacji EA z wzdłużnymi zmianami mikrogeometrii występującymi na powierzchni obrabianej, a zarejestrowanymi na profilach chropowatości. Można natomiast, ponownie potwierdzić wszechstronność parametrów $K_{\beta}(EA_{RMS})$ i $S_{k\beta}(EA_{RMS})$, które jako jedyne wykazywały częściowy związek ze zmianami parametru $RS_{m(w)}$ – tab. 4.8.55 (\Box 221) oraz tab. 4.8.56 (\Box 222).

Opracowany i wcześniej omówiony wskaźnik energii impulsów EA przypadającej na jednostkową powierzchnię kontaktu (q_{RMS}), także wykazał niską korelację ze zmianami wzdłużnymi profilu chropowatości, wyrażonymi poprzez zmiany średniego odstępu miejscowych wzniesień powierzchni próbek ($RS_{m(w)}$) – tab. 4.8.57 (\Box 223).



Tab. 4.8.55. Zmiany średniego odstępu miejscowych wzniesień profilu chropowatości $(RS_{m(w)})$ powierzchni próbek w funkcji współczynnika koncentracji rozkładu *beta* dla RMS sygnału EA ($K_B(EA_{RMS})$)

Ujmując wyniki relatywnie, relacje wyznaczone dla zależności $RS_{m(w)} = f(q_{RMS})$ wykazały ściślejsze korelacje w porównaniu do pozostałych parametrów powiązanych z sygnałem EA ($s^2(EA_{RMS})$, $m_4(EA_{RMS})$, $K(EA_{RMS})$ oraz $K_\beta(EA_{RMS})$ i $S_{k\beta}(EA_{RMS})$). Jednakże, także i one nie są istotne statystycznie, co oznacza, że nie można ich wykorzystać do przewidywania konkretnych wartości cech wzdłużnych profilu chropowatości przedmiotu szlifowanego, ani do wyznaczenia okresu trwałości narzędzia.

Wszystkie dotychczas opisane relacje, które charakteryzowały się niską jakością dopasowania modeli do danych doświadczalnych wynikały z odmiennego kierunku zmian, jakim ulegały zestawione ze sobą wielkości. Podczas, gdy parametry charakterystyczne dla sygnału EA (EA_{RMS} , $s^2(EA_{RMS})$, $m_4(EA_{RMS})$, $K(EA_{RMS})$, $K_\beta(EA_{RMS})$, $S_{k\beta}(EA_{RMS})$ oraz q_{RMS}) w funkcji czasu posiadały globalnie charakter monotoniczny – wzrostowy lub spadkowy, to wartości $R_{a(w)}$ oraz $RS_{m(w)}$ w funkcji postępującego zużycia ściernicy posiadały dwa charakterystyczne etapy. Pierwszy charakteryzował się wyraźnym wzrostem wartości, po czym (w drugim etapie) następował powolny spadek wartości.



Tab. 4.8.56. Zmiany średniego odstępu miejscowych wzniesień profilu chropowatości $(RS_{m(w)})$ powierzchni próbek w funkcji współczynnika asymetrii rozkładu *beta* dla RMS sygnału EA $(S_{k\beta}(EA_{RMS}))$

Trend zmian opisywanych parametrów (silniejszy dla $RS_{m(w)}$) wynikał ze sposobu w jaki ściernica ulegała zużyciu – wstępnie wytrzymałościowemu (stąd zaobserwowany chwilowy wzrost wartości średniej wysokość chropowatości powierzchni ściernicy i próbek oraz wyraźny wzrost odległości między wzniesieniami dla analizowanych profili), aby przejść do zużycia o charakterze ściernym w późniejszym okresie jej pracy.

Zaistnienie powyżej opisanych rozbieżności uniemożliwiło powstanie silnych zależności pomiędzy obserwowanymi czynnikami wyjściowymi (sygnałem EA oraz parametrami chropowatości profili próbek) dla procesu obróbki szlifowaniem przeprowadzonego w przyjętych warunkach i badanym okresie czasu pracy ściernic.

Znacznie korzystniejsze wyniki (w znaczeniu statystycznym) otrzymano w trakcie analizy regresji wielorakiej, w której do parametrów sygnału emisji akustycznej odniesiono równocześnie parametry wysokościowe ($R_{a(w)}$) oraz wzdłużne ($RS_{m(w)}$) profili powierzchni próbek poddanych obróbce. W tym przypadku, określono modele statystycznie istotne dla większej liczby konfiguracji procesu szlifowania, niż miało to miejsce przy rozpatrywaniu relacji pomiędzy poszczególnymi parametrami (uwzględnionymi pojedynczo), co zestawiono w tab. 4.8.62, (\Box 226).



Tab. 4.8.57. Zmiany średniego odstępu miejscowych wzniesień profilu chropowatości $(RS_{m(w)})$ powierzchni próbek w funkcji energii emisji akustycznej przypadającej na powierzchnie jednostkową (q_{RMS})

Analizowane parametry chropowatości charakteryzowały się najsilniejszą współzależnością z momentem 4. rzędu (parametr $m_4(EA_{RMS})$ – tab. 4.8.58, \Box 224) oraz parametrami rozkładu beta sygnału emisji akustycznej, czyli: $K_{\beta}(EA_{RMS})$ (tab. 4.8.59, \Box 224) i $S_{k\beta}(EA_{RMS})$ (tab. 4.8.60, \Box 225).

Wyniki analiz relacji wielorakiej ponownie potwierdziły istnienie ściślejszej zależności pomiędzy rejestrowanymi parametrami sygnału EA, a parametrami wysokościowymi $(R_{a(w)})$ profili powierzchni przedmiotów obrabianych, w przeciwieństwie do parametrów wzdłużnych $(RS_{m(w)})$. Świadczą o tym wyższe wartości standaryzowanych współczynników regresji, których wielkość pozwala porównać relatywny wkład, jaki każda ze zmiennych niezależnych wnosi w predykcję zmiennej zależnej, a także większe wartości testu *t-Studenta* oraz wartości poziomu istotności (*poziom-p*).

Zmiany wskaźnika energii impulsów emisji akustycznej przypadającej na jednostkową powierzchnię (q_{RMS}) w funkcji średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości (parametr $R_{a(w)}$) oraz średniego odstępu miejscowych wzniesień profilu chropowatości (parametr $RS_{m(w)}$) powierzchni próbek wykazały relatywnie wysokie dopasowanie. Korelacje te nie są przypadkowe ze względu na występowanie ich dla różnych warunków szlifowania. Tab. 4.8.58. Zmiany momentu 4. rzędu z wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej ($m_4(EA_{RMS})$) w funkcji średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości ($R_{a(w)}$) oraz średniego odstępu miejscowych wzniesień profilu chropowatości ($RS_{m(w)}$) powierzchni próbek



Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Tab. 4.8.59. Zmiany współczynnika koncentracji rozkładu *beta* dla wartości skutecznej sygnału EA ($K_{\beta}(EA_{RMS})$) w funkcji średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości ($R_{a(w)}$) oraz średniego odstępu miejscowych wzniesień profilu chropowatości ($RS_{m(w)}$) powierzchni próbek



(verte •)

Tab. 4.8.59. (ciąg dalszy)

$K_{\beta}(EA_{RMS}) = 42,883-273,042 \cdot R_{a(w)} + 0,904 \cdot RS_{m(w)}$					$K_{\beta}(EA_{RMS}) =$	25,135-124,7	$47 \cdot R_{a(w)} + 0,29$	$7 \cdot RS_{m(w)}$	
	st. współ.	współ.	t ₍₆₎	poziom p		st. współ.	współ.	t ₍₁₅₎	poziom p
w. wolny	n.d.	42,883	0,73598	0,489503	w. wolny	n.d.	25,135	3,37285	0,004184
$R_{a(w)}$	-0,96304	-273,042	-1,76493	0,128018	$R_{a(w)}$	-0,90019	-124,747	-2,43314	0,027951
$RS_{m(w)}$	0,172060	0,904	0,31533	0,763192	$RS_{m(w)}$	0,278471	0,297	0,75268	0,463290
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	$K_{\beta}(EA_{RMS}); f(R_{a(w)}, RS_{m}) = 0.811764 \\ 0.658961 \\ 0.545281 \\ 5.796640 \\ 0.039666 \\ 0.14 \\ 0.4469 \\ 0.039661 \\ 0.039661 \\ 0.039660 \\ 0.03960 \\ 0$	2(w))			$\begin{tabular}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	$K_{\beta}(EA_{RMS}); f(R_{a(w)}, RS_n) = 0,676608 = 0,457799 = 0,385505 = 6,332508 = 0,010144 = 0,668 = 0,1314$	(w))		

Wyniki analiz wykazały, że ponownie uwidocznił się ściślejszy (silniejszy) związek między parametrami wysokościowymi ($R_{a(w)}$), a pochodną sygnału EA_{RMS} (w tym przypadku q_{RMS}) w porównaniu do parametru wzdłużnego profilu ($RS_{m(w)}$).

Tab. 4.8.60. Zmiany współczynnika asymetrii rozkładu *beta* dla wartości skutecznej sygnału EA ($S_{k\beta}(EA_{RMS})$) w funkcji średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości ($R_{a(w)}$) oraz średniego odstępu miejscowych wzniesień profilu chropowatości ($RS_{m(w)}$) powierzchni próbek



Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Tab. 4.8.61. Zmiany energii emisji akustycznej przypadającej na powierzchnię jednostkową (q_{RMS}) w funkcji średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości ($R_{a(w)}$) oraz średniego odstępu miejscowych wzniesień profilu chropowatości ($RS_{m(w)}$) powierzchni próbek



Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Analiza wyników statystycznych wykazała, że najlepszą korelację z mikrogeometrycznymi parametrami powierzchni szlifowanej wykazują parametry statystyczne sygnału EA należące do grupy opisującej rozkład wartości sygnału, a w szczególności przedstawiające miarę natężenia (skupienia) poszczególnych elementów wokół wartości średniej.

Tab. 4.8.62. Zestawienie porównawcze jakości otrzymanych relacji między parametrami sygnału emisji akustycznej, a średnią arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości $(R_{a(w)})$ oraz średnim odstępem miejscowych wzniesień profilu chropowatości $(RS_{m(w)})$

	99A60J7V	99A60M7V	99A60J7V	99A60M7V	99A60J7V	99A60M7V	0/.
	$v_{ft} = 4$	m/min	$v_{ft} = 14$	4 m/min	$v_{ft} = 24$	4 m/min	/0
EA_{RMS}	•	•	•	•	•	0	83,3
$s^2(EA_{RMS})$	•	•	0	•	•	0	66,7
$m_4(EA_{RMS})$	•	•	•	•	•	0	83,3
$K(EA_{RMS})$	•	•	0	0	٠	•	66,7
$K_{\beta}(EA_{RMS})$	•	•	0	0	٠	•	66,7
$S_{k\beta}(EA_{RMS})$	•	•	0	0	•	•	66,7
q_{RMS}	•	•	0	•	•	•	83,3

 $(verte \bullet)$

	99A60J7V	99A60M7V	99A60J7V	99A60M7V	99A60J7V	99A60M7V	0/
	$v_{ft} = 4$	m/min	$v_{ft} = 14$	4 m/min	$v_{ft} = 24$	%	
ARMS	0	•	0	0	0	0	16,7
(EA_{RMS})	0	•	0	0	•	0	33,3
$_{4}(EA_{RMS})$	0	0	0	•	0	0	16,7
(EA_{RMS})	0	•	0	0	•	•	50,0
$\beta(EA_{RMS})$	•	0	0	0	•	•	50,0
$_{\beta}(EA_{RMS})$	•	•	0	0	0	•	50,0
RMS	•	0	•	0	•	•	66,7
genda: ● –	wysoka wspó	izależność, ∘ – : Wyniki dla reg	niska współzal gresji wielora	leżność. akiej: $EA = f(B)$	$R_{a(w)}, RS_{m(w)})$		
genda: ● –	wysoka wspó	izależność, ∘ – : Wyniki dla reg	niska współzal gresji wielora	eżność. akiej: $EA = f(I)$	$R_{a(w)}, RS_{m(w)})$ 99A6017V	99A60M7V	
genda: ● –	wysoka wspó 99A60J7V $y_{\theta} = 4$	tzależność, ∘ – Wyniki dla reg 99A60M7V m/min	niska współzal gresji wielora 99A60J7V v _e = 14	eżność. akiej: $EA = f(I$ 99A60M7V 4 m/min	$R_{a(w)}, RS_{m(w)})$ 99A60J7V $v_{\alpha} = 24$	99A60M7V 4 m/min	%
genda: • – A_{RMS}	wysoka wspó 99A60J7V $v_{ft} = 4$	izależność, ○ – : Wyniki dla reg 99A60M7V ∙ m/min	niska współzal gresji wielora 99A60J7V $v_{ff} = 14$	eżność. akiej: $EA = f(I)$ 99A60M7V 4 m/min \circ	$R_{a(w)}, RS_{m(w)})$ 99A60J7V $v_{ft} = 2^{4}$	99A60M7V 4 m/min 0	%
genda: • – $\frac{A_{RMS}}{(EA_{RMS})}$	wysoka wspó 99A60J7V $v_{ft} = 4$ o	Izależność, ○ – : Wyniki dla reg 99A60M7V ↓ m/min ●	niska współzal gresji wielora 99A60J7V $v_{fi} = 14$ \circ	eżność. akiej: <i>EA = f[1</i> 99A60M7V 4 m/min •	$R_{a(w)}, RS_{m(w)})$ 99A60J7V $v_{fl} = 2^{2}$ •	99A60M7V 4 m/min 0	% 50,0 33,3
genda: • – $\frac{A_{RMS}}{(EA_{RMS})}$ $\frac{4(EA_{RMS})}{4(EA_{RMS})}$	wysoka wspó 99A60J7V $v_{ff} = 4$ \circ	Izależność, ○ – Wyniki dla reg 99A60M7V ↓ m/min ●	niska współzal gresji wielora 99A60J7V $v_{fi} = 1^2$ \circ	eżność. akiej: <i>EA = f[1</i> 99A60M7V 4 m/min •	$\begin{array}{c} R_{a(w)}, RS_{m(w)}) \\ \hline 99A60J7V \\ v_{fi} = 2^{2} \\ \bullet \\ \circ \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \end{array}$	99A60M7V 4 m/min 0 0	% 50,0 33,3 83,3
genda: • – $\frac{A_{RMS}}{(EA_{RMS})}$ $\frac{(EA_{RMS})}{(EA_{RMS})}$	wysoka wspó 99A60J7V $v_{ft} = 4$ \circ \bullet	Izależność, ○ – Wyniki dla reg 99A60M7V ↓ m/min ● ● ●	niska współzal gresji wielora 99A60J7V $v_{fi} = 12$ \circ \bullet	eżność. akiej: $EA = f(I)$ 99A60M7V 4 m/min \circ \bullet \bullet \circ	$R_{a(w)}, RS_{m(w)})$ 99A60J7V $v_{fi} = 24$ \circ \bullet \bullet	99A60M7V 4 m/min 0 0 0	% 50,0 33,3 83,3 66,7
genda: • – A_{RMS} (EA_{RMS}) $_4(EA_{RMS})$ $_6(EA_{RMS})$	wysoka wspó 99A60J7V $v_{ft} = 4$ \circ \bullet	Izależność, ○ – Wyniki dla reg 99A60M7V ↓ m/min ● ● ●	niska współzal gresji wielora 99A60J7V $v_{fi} = 1^2$ \odot \bullet	eżność. akiej: $EA = f(I)$ 99A60M7V 4 m/min 0 • • • • • • • • • • • • • • • • • •	$R_{a(w)}, RS_{m(w)})$ 99A60J7V $v_{fi} = 2^{2}$ \circ \bullet \bullet \bullet	99A60M7V 4 m/min 0 0 0 0 0 0	% 50,0 33,3 83,3 66,7 83,3
$\underbrace{A_{RMS}}_{(EA_{RMS})}$ $\underbrace{(EA_{RMS})}_{\theta(EA_{RMS})}$ $\underbrace{(EA_{RMS})}_{\theta(EA_{RMS})}$ $\underbrace{(EA_{RMS})}_{\theta(EA_{RMS})}$	wysoka wspó 99A60J7V v _{ft} = 4 • • • • • • • • • • •	Izależność, ○ – : Wyniki dla reg 99A60M7V ↓ m/min ● ● ● ●	niska współzal gresji wielora 99A60J7V $v_{fi} = 12$ \odot \bullet \bullet	eżność. akiej: $EA = f(I)$ 99A60M7V 4 m/min 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	$R_{a(w)}, RS_{m(w)})$ 99A60J7V $v_{fi} = 2^{2}$ \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet	99A60M7V m/min 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	% 50,0 33,3 83,3 66,7 83,3 83,3

Tab. 4.8.62. (ciąg dalszy)

Do tej grupy parametrów należą: $m_4(EA_{RMS})$, $K_\beta(EA_{RMS})$ i $S_{k\beta}(EA_{RMS})$, przy czym, najwyższe współczynniki korelacji uzyskano dla parametru kurtoza oraz wskaźnika skośności rozkładu *beta* sygnału EA. Oznacza to, że pomimo otrzymanej ogólnie niskiej korelacji sygnału EA z parametrami chropowatości powierzchni otrzymanej w wyniku procesu szlifowania, impulsy emisji akustycznej przenoszą część informacji związanej z kształtowaniem się geometrii powierzchni obrabianej.

Przeprowadzone badania i wyniki ich analiz, świadczą w głównej mierze o tym, że sygnał EA niesie ze sobą ilościowe informacje o zjawiskach zachodzących w strefie szlifowania i jest on ściśle powiązany ze zmianami czynnej powierzchni ściernicy, a także częściowo z mikrogeometrycznymi zmianami zachodzącymi na powierzchni próbek.

Wnioski dotyczące korelacji sygnału EA z parametrami mikrogeometrii powierzchni przedmiotów szlifowanych

Z przeprowadzonych badań oraz analizy wyników dotyczących korelacji sygnału EA z parametrami mikrogeometrii powierzchni przedmiotów szlifowanych sformułowano następujące wnioski:

- Zmiany mikrogeometryczne powierzchni obrabianych, zarejestrowane w funkcji czasu pracy ściernicy, charakteryzując się znacznym rozrzutem wartości w lokalnych punktach pomiarowych, nie wykazały ścisłego powiązania z rejestrowanymi w trakcie obróbki zmianami sygnału EA.
- Wyniki badań wykazały, że sygnał EA z uwagi na swoje szczególe źródła pochodzenia, stanowi parametr o wysoce selektywnej (szczególnie zależnej od dobranych warunków pracy narzędzia) przydatności w dziedzinie przewidywania wynikowej geometrii powierzchni poddanej procesowi szlifowania.
- Jednakże parametry opisujące cechy mikrogeometryczne profili powierzchni próbek poddanych procesowi szlifowania, mogą być w pewnym stopniu oceniane poprzez od-

powiednią interpretację wartości parametrów statystycznych zarejestrowanego sygnału emisji akustycznej podczas przebiegu procesu.

- Ocena ta jest pośrednia i charakteryzuje się względnie niską jakością predykcji dla opracowanych modeli.
- Aby ustalić dokładne modele zależności pomiędzy sygnałami EA, a parametrami geometrycznymi powierzchni szlifowanej, należałoby przeprowadzić badania znacznie bardziej rozszerzone i skupione tylko na tym zagadnieniu (aktualne wyniki dobrze korelują jedynie z postępującym zużyciem ściernic).
- W trakcie sterowania obróbką szlifowaniem, w celu zapewnienia niskich chropowatości przedmiotu, należałoby optymalizować przebieg procesu pod kątem rejestrowania względnie wysokich lub niskich wartości odpowiednich parametrów sygnału emisji akustycznej. Jednak z powodu charakteru zmian tych parametrów w trakcie postępującego zużycia ściernic, należałoby równocześnie unikać przekroczenia ich granicznych wartości, gdyż mogłoby to spowodować szlifowanie ściernicą o startych ziarnach i przełożyć się na niekorzystne kształtowanie się innych cech warstwy wierzchniej po obróbce.
- Wyniki badań świadczą o braku współzależności pomiędzy sygnałem EA, a cechami wzdłużnymi profilu chrapowatości, wyrażonymi przez średni odstęp miejscowych wzniesień profilu powierzchni próbek ($RS_{m(w)}$). Jednakże, pomimo braku wiążących korelacji w sferze ogólnej, analiza wyników statystycznych regresji wykazała, że przypadkowe powiązania wystąpiły głównie dla parametru kurtoza $K_{\beta}(EA_{RMS})$ oraz skośności rozkładu *beta* dla sygnału emisji akustycznej $S_{k\beta}(EA_{RMS})$.
- Ze wszystkich przeanalizowanych parametrów sygnału EA, najlepszą jakość predykcji wartości wyjściowych równań regresji w odniesieniu do punktów pomiarowych badań eksperymentalnych otrzymano dla wskaźnika q_{RMS}, który wyraża ilość energii impulsów emisji akustycznej przypadającej na jednostkową powierzchnię kontaktu ściernicaprzedmiot.

Korelacje sygnału EA z naprężeniami własnymi w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego

Analiza wyników oszacowanych naprężeń (rozdz. 4.8.2), pozwoliła jednoznacznie stwierdzić, że należy spodziewać się wzrostu naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego w wyniku postępującego zużywania narzędzia. Wynikało to z faktu zaistnienia wzrostu powierzchni kontaktu narzędzia z przedmiotem obrabianym w kolejnych fazach zużycia ściernicy, co z kolei powoduje wzrost siły i energii szlifowania, a w konsekwencji, także temperatury w strefie obróbki. Z kolei, analiza uśrednionych wartości EA_{RMS} z całego analizowanego okresu trwałości ściernicy, pozwoliła stwierdzić, że wyższe wartości posuwu stycznego stołu szlifierki (a za razem większa dynamika przebiegu procesu) powodowały ogólne podniesienie rejestrowanych wartości emisji akustycznej.

Powyższe aspekty (wynikające z przeprowadzonych eksperymentów) oraz część badań przeprowadzonych przez innych naukowców, m.in. [Dud1996, Maj1998, DP1999], dały przesłanki do postawienia hipotezy o istnieniu korelacji pomiędzy wartościami naprężeń otrzymanych po procesie szlifowania, a wartościami EA rejestrowanej w trakcie trwania tego procesu. Ponadto, istnienie ścisłej i jednoznacznej zależności pozwoliłoby wnioskować z dużym prawdopodobieństwem o wynikach przebiegu procesu, a w szczególności o jakości otrzymywanych powierzchni, a także ułatwiłoby optymalizację procesu. W przeprowadzonych badaniach zaobserwowano konsekwentny wzrost wartości współczynnika koncentracji $K_{\beta}(EA_{RMS})$ dla rozkładu *beta* w funkcji czasu szlifowania. Ponadto, z faktu wysokiej korelacji z geometrycznym wskaźnikiem zdolności skrawnych (K_{CPS}), można założyć, że jest to najbardziej korzystny parametr, który można zastosować do opisu zmian związanych ze zużyciem ściernicy, a tym samym do przewidywania naprężeń zalegających w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego.

Weryfikację prawdziwości powyżej sformułowanej hipotezy zrealizowano w dwóch etapach: zbadanie relacji pomiędzy naprężeniami, a geometrycznymi skutkami zużycia ściernic (rozdz. 4.8.2) oraz zbadanie bezpośredniej zależności występującej między zmianami rozpatrywanych czynników wyjściowych procesu szlifowania (σ_{max} i parametry sygnału EA).

Przeprowadzona analiza zmian sygnału EA, uwzględniająca jedynie podstawowy parametr impulsów EA związany z przenoszoną przez nie energią (wartość skuteczna EA_{RMS}), nie wykazała jednoznacznej korelacji ze zużyciem ściernicy, a tym samym z wartościami naprężeń w warstwie wierzchniej (tab. 4.8.63, D229).

Tab. 4.8.63. Korelacje pomiędzy maksymalnymi wartościami naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego (σ_{max}), a rejestrowanymi wartościami skutecznymi sygnału emisji akustycznej (EA_{RMS}) w trakcie procesu szlifowania



Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności α = 0,05.

Jedynym wyraźnym aspektem we współzależności obu badanych zmiennych jest zbliżony kształt linii trendu dla różnych warunków przebiegu procesu obróbki szlifowaniem. Świadczą one o tym, że wraz ze wzrostem średniej wartości rejestrowanych sygnałów EA, można spodziewać się wzrostu naprężeń. Jednakże, sygnał EA_{RMS} po przekroczeniu pewnej wartości zaczyna spadać (gdy ściernica przechodzi do kolejnej, nieodwracalnej fazy zużycia), a wartości naprężeń wciąż rosną. Dlatego też, analizowanej zależności nie można wykorzystać do celów praktycznych (przewidywania stopnia zużycia narzędzia lub oceny jakości powierzchni), szczególnie bez znajomości całe historii zmian wartości zachodzących dla obu parametrów.

Z przedstawionych wcześniej wyników w ramach badań rozpoznawczych oraz częściowo w trakcie analizy zmian geometrii CPS (rozdz. 4.8.1), wynika, że wielkość sygnału EA w dużym stopniu zależała od przekroju warstw skrawanych pojedynczym ziarnem (parametr a_{zrs}), a z kolei wielkość tego przekroju była uzależniona od stopnia, rodzaju i charakteru zużycia ściernicy (głównie parametry: K_{CPS} , B_{kr} oraz l_{st}). W ogólnym ujęciu duże wartości skuteczne sygnału EA powstają, gdy ziarna skrawają z dużymi przekrojami (badania rozpo-znawcze, tab. 4.6.5 w rozdz. 4.6.2).

Tab. 4.8.64. Korelacje pomiędzy maksymalnymi wartościami naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego (σ_{max}), a zarejestrowanymi zmianami wariancji dla wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej ($s^2(EA_{RMS})$) w trakcie procesu szlifowania



Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Ponieważ przyrost ilości wierzchołków skrawających (mikrozużycie) zmniejsza przekroje warstwy skrawanej przypadającej na jedno ziarno, wartości skuteczne EA maleją. Jednakże zaobserwowane w badaniach wyraźne i dominujące makrozużycie CPS (szczególnie w przypadku ściernicy o nominalnie mniejszej twardości: 99A60J7V) powodowało znaczący wzrost ilości wierzchołków ziaren aktywnych, zwiększając tym samym poziom emitowanego sygnału EA.

Równocześnie, wcześniejsze wyniki badań wykazały, że postępujące zużycie pozostaje w ścisłej współzależności z wartościami rozciągających naprężeń własnych ($+\sigma_{max}$) w warstwie wierzchniej szlifowanego przedmiotu. W początkowych warunkach pracy ściernicy, gdy wielkość powierzchni kontaktu z przedmiotem (przy stałych parametrach obróbki) była niewielka i głownie zależna od zmian parametru B_{kr} , natężenie strumienia cieplnego oddziaływującego na przedmiot obrabiany było niskie, a sprawność odprowadzania ciepła ze strefy obróbki znacząco większa w porównaniu do kolejnych faz zużycia narzędzia. Najmniej korzystne warunki powstałe, gdy ściernica utraciła zdolność skrawną, charakteryzowały się pojawieniem przypaleń szlifierskie na powierzchni przedmiotu obrabianego i wysokimi wartościami oszacowanych naprężeń.

Tab. 4.8.65. Korelacje pomiędzy maksymalnymi wartościami naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego (σ_{max}), a zarejestrowanymi zmianami momentu 4. rzędu z wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej ($m^4(EA_{RMS})$) w trakcie procesu szlifowania



Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Powyższe aspekty potwierdzają, że wielkość obciążenia ziarna w strefie szlifowania, regulowana poprzez odpowiedni dobór parametrów obróbki lub też wynikłe z powodu zużycia ściernicy, ma jednoczesny wpływ na maksymalną wartość naprężeń (σ_{max}), średnią wartość skuteczną sygnału EA (EA_{RMS}), a tym samym an charakter i stopień korelacji pomiędzy tymi wielkościami ($\sigma_{max} = f(EA_{RMS})$).

W wyniku zaistnienia powyższych faktów, do analizy emisji akustycznej wprowadzono kolejne czynniki w postaci parametrów statystycznych sygnału EA_{RMS} . Podobnie, jak w przypadku interpretacji sygnału EA w postaci wartości skutecznej (EA_{RMS}) , nie odnotowano wyraźnej i istotnej statystycznie zależności dla wariancji sygnału EA w odniesieniu do oszacowanych naprężeń skumulowanych w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego – tab. 4.8.64 (\Box 230). Ponownie jednak, odnotowano obecność ogólnej zależności o charakterze proporcjonalnym. Wzrost rozproszenia sygnału EA_{RMS} wokół wartości średniej może świadczyć o wzroście naprężeń zalegających w warstwie wierzchniej materiału szlifowanego.

Moment 4. rzędu, który świadczy mierze natężenia koncentracji (skupienia) poszczególnych elementów próby wokół ich wartości średniej, a w badaniach wykazał ograniczone możliwości zastosowanie do analizy stanu CPS, nie współgrał także ze zmianami naprężeń w funkcji czasu pracy ściernicy – tab. 4.8.65 (\Box 231). Analiza wyników badań nie wykazała obecności statystycznie istotnej korelacji, a ponadto, otrzymane linie trendu zdecydowanie różniły się między sobą dla różnych warunków pracy ściernic, co świadczy o braku nawet częściowej współzależności. Oznacza to, że także zależność $m^4(EA_{RMS}) = f(\sigma_{max})$ nie może zostać wykorzystana w celach praktycznych.

Tab. 4.8.66. Korelacje pomiędzy maksymalnymi wartościami naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego (σ_{max}), a zarejestrowanymi zmianami parametru kurtoza wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej ($K(EA_{RMS})$) w trakcie procesu szlifowania



Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Znacznie wyraźniejszą zależnością (w porównaniu do poprzednio opisywanych parametrów), wyrażoną poprzez względnie wysokie wartości współczynnika korelacji R, charakteryzowały się równania otrzymane przy porównaniu σ_{max} do przebiegów $K(EA_{RMS})$. Pomimo, że wyznaczone równania nie wykazywały istotności statystycznej (wysokie wartości *poziomu-p* oraz $F < F_{kr}$), to utworzone linie trendu wyraźnie wskazują na to, że spadek rejestrowanej wartości $K(EA_{RMS})$ może być powiązany ze wzrostem naprężeń. Oznacza to, że w przypadku, gdy rozkład sygnału EA charakteryzuje się coraz szerszym rozłożeniem wartości wokół wartości średniej, przez co wysokość rozkładu maleje, to można spodziewać się coraz większych naprężeń – tab. 4.8.66 (D232). Jednakże, ze względu na niską istotność statystyczną, nie można otrzymanych zależności traktować, jako wiążących i wykorzystać ich w celach poznawczych przebiegu procesu szlifowania.

Tab. 4.8.67. Korelacje pomiędzy maksymalnymi wartościami naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego (σ_{max}), a rejestrowanymi zmianami parametru kurtoza rozkładu *beta* dla wartości skutecznej sygnału EA ($K_{\beta}(EA_{RMS})$) w trakcie procesu szlifowania



Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności α = 0,05.

Odmiennym charakterem i użytecznością w porównaniu do dotychczas omawianych wielkości, wykazały się parametry charakteryzujące rozkład *beta*. Zarówno spłaszczenie $K_{\beta}(EA_{RMS})$, jak i skośność $S_{k\beta}(EA_{RMS})$, okazały się ściśle skorelowane z oszacowanymi wartościami naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotów poddanych obróbce: tab. 4.8.67 (D233) oraz tab. 4.8.68 (D234).

Porównując wartości współczynników korelacji otrzymanych dla równań, można wywnioskować, że mają one wysoką zgodność z wyznaczonymi równaniami. Wartości R stanowią wskaźniki jakości dopasowania modelu do danych, a ponieważ są one wysokie, to zmienność zmiennej zależnej (K_β) może być objaśniona przez zmienne niezależne włączone do modelu (σ_{max}). Porównując wartości testu F z jego wartością krytyczną można wywnio-

skować, że otrzymane relacje są statystycznie adekwatne do danych ($F > F_{kr}$). Świadczą też o tym wartości p, które są mniejsze od przyjętej wartości poziomu istotności α .

Tab. 4.8.68. Korelacje pomiędzy maksymalnymi wartościami naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego (σ_{max}), a zarejestrowanymi zmianami asymetrii rozkładu wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej ($S_{k\beta}(EA_{RMS})$) w trakcie procesu szlifowania



Z samego przebiegu linii trendu można wywnioskować, że wzrosty parametru $K_{\beta}(EA_{RMS})$ oraz bezwzględnej wartości $S_{k\beta}(EA_{RMS})$ powiązane są z eskalacją naprężeń gromadzących się w warstwie wierzchnie przedmiotu obrabianego.

Opisane zjawiska i zależności miały miejsce zarówno w przypadku małych przyrostów parametru B_{kr} (dla ściernicy twardej – 99A60M7V), jak i dla relatywnie większych przyrostów czynnej szerokości ściernicy (w przypadku ściernicy o nominalnie mniejszej twardości – 99A60J7V). Oznacza to, że niezależnie od charakteru zużycia ściernicy, odnotowano silne korelacje między zmianami sygnału EA oraz oszacowanymi wartościami naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego. Zjawisko występowania ogólnego podobieństwa i analogię w zmianach lokalnych można wykorzystać w celu zapobiegania gromadzenia się wysokich naprężeń (szczególnie niekorzystnych, czyli rozciągających: $+\sigma_{max}$) w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego. W tym celu należałoby przeprowadzić proces szlifowania tylko w okresie, gdy ze strefy kontaktu *przedmiot - narzędzie* obierane są względnie niskie wartości współczynnika spłaszczenia $K_{\beta}(EA_{RMS})$.

Ponieważ z przebiegu opracowanego w ramach badań wskaźnika q_{RMS} można wnioskować o postępującym starciu narzędzia, do analiz wprowadzono, także badanie relacji występującej pomiędzy wskaźnikiem energii impulsów emisji akustycznej przypadającej na jednostkową powierzchnię kontaktu ściernicy ($B_{kr} \times l_g$), a naprężeniami maksymalnymi warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego. Wyniki analiz statystycznych zamieszczono w poniższej tablicy (tab. 4.8.69, \Box 235).

Tab. 4.8.69. Korelacje pomiędzy maksymalnymi wartościami naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego (σ_{max}), a zarejestrowanymi zmianami wskaźnika energii impulsów emisji akustycznej przypadającej na jednostkową powierzchnię (q_{RMS}) w trakcie procesu szlifowania



Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności α = 0,05.

Korelacje pomiędzy maksymalnymi wartościami naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego (σ_{max}), a zarejestrowanymi zmianami wskaźnika energii impulsów emisji akustycznej przypadającej na jednostkową powierzchnię (q_{RMS}) w trakcie procesu szlifowania, wskazują na bardzo ścisłą i jednoznaczną zależność, którą potwierdzają wysokie wartości współczynnika korelacji/determinacji. Spadek wartości wskaźnika q_{RMS} , świadczącego o postępującym zużyciu ściernicy, okazał się bardzo dobrze skorelowany ze wzrostem naprężeń.

Na uwagę zasługuje fakt, że wraz ze wzrostem naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego, w funkcji czasu pracy ściernicy, rejestrowano spadek energii impulsów emisji akustycznej. Zaistnienie powyższego zjawiska podyktowane jest zmieniającym się udziałem źródeł impulsów EA, z tych pochodzących od ściernicy (wytwarzających energetycznie silne impulsy) na impulsy o zdecydowanie niższym potencjale energetycznym (pochodzącym na przykład od tarcia ziaren ściernicy o powierzchnię przedmiotu szlifowanego). Z uwagi na powyższe aspekty, otrzymane równania regresji z powodzeniem można wykorzystać w celu przewidywania wielkości naprężeń, czyli jakości powierzchni obrabianej.

Tab. 4.8.70. Zestawienie otrzymanych współczynników korelacji pomiędzy maksymalnymi wartościami naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego (σ_{max}), a składowymi siły szlifowania (F_c , F_n , q_{Fc} , q_{Fn}) oraz sygnałami EA (EA_{RMS} , $K_{\beta}(EA_{RMS})$, q_{RMS})

T1-250x32x98-99A60J7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5$ [m/s], $a_e = 0,03$ [mm],				T1-250x NC10 (6	32x98-99A 0±2) HRC,	60M7V-42n $v_s = 27,5 [m]$	$a/s, a_e = 0, 0$	3 [mm],	
$f_a = 0,3$	mm/skok],	$Q_c = 3 \times 10$	0^{-3} [m ³ min ⁻¹]]	$f_a = 0,3$ [mm/skok],	$Q_c = 3 \times 10^{-3}$	[m [°] min ⁻¹]	
				$v_{ft} = 1$	4 [m/min]				
	σ_{max} :	σ_{max} :	EA_{RMS} :	σ_{max} :		σ_{max} :	σ_{max} :	EA_{RMS} :	$K_{\beta}(EA_{RMS})$:
	$f(F_n)$	$f(F_c)$	$f(\sigma_{max})$	$f(K_{\beta}(EA_{RMS}))$		$f(F_n)$	$f(F_c)$	$f(\sigma_{max})$	$f(\sigma_{max})$
R	0,6472	0,6059	0,98909	0,95041	R	0,1073	0,1746	0,628811	0,98811
R^2	0,4188	0,3671	0,97831	0,90327	R ²	0,0115	0,0305	0,395403	0,97636
R ² skor.	0,2735	0,2089	0,96385	0,83879	R ² skor.	-0,318	-0,2927	-0,20919	0,95273
$F_{(1,4)}$	2,8824	2,3206	67,65131	14,0076	F _(1,4)	0,035	0,0944	0,653996	41,30874
р	0,1648	0,2023	0,00319	0,03008	р	0,8636	0,7788	0,604597	0,02364
-	1	1				1		-	-
	σ_{max} :	σ_{max} :	q_{RMS}			σ_{max} :	σ_{max} :	q_{RMS} :	
D	$f(q_{Fn})$	$f(q_{Fc})$	$f(\sigma_{max})$	-	D	$f(q_{Fn})$	$f(q_{Fc})$	$f(\sigma_{max})$	_
R P ²	0,8927	0,92159	0,90516	05	R P ²	0,8901	0,93938	0,9978	_
R^2	0,797	0,84933	0,81932	24	R ²	0,7923	0,88243	0,9956	_
R ² skor.	0,7462	0,81166	0,69887	4	R ² skor.	0,7231	0,84324	0,9913	_
$F_{(1,4)}$	15,7016	22,5480	2 6,80216		F _(1,4)	11,4465	22,51666	228,8034	_
р	0,0166	0,00898	0,07679	18	р	0,043	0,01775	0,0044	
				$v_{ft} = 2$	24 m/min				
	σ_{max}	σ_{max}	EARMS:	KR(EARMS):		σ_{max}	σmax.	EARMS:	Kr(EARMS):
	$f(F_n)$	$f(F_c)$	$f(\sigma_{max})$	$f(\sigma_{max})$		$f(F_n)$	$f(F_c)$	$f(\sigma_{max})$	$f(\sigma_{max})$
R	0.2014	0.788	0.783869	0.942483	R	0.8336	0.775	0.882233	0.8761
R^2	0,0406	0,621	0,614451	0,888273	R^2	0,6949	0,6006	0,778334	0,76755
R^2_{skor}	-0,2792	0,4947	0,228902	0,776547	R^{2}_{skor}	0,5932	0,4675	0,556668	0,535101
	,	/	/	,		/		,	
F(14)	0.1269	4.916	1.593704	7.950427	F(1.4)	6.834	4.511	3.511297	3.302008
F _(1,4)	0,1269	4,916 0.1133	1,593704 0.385549	7,950427 0,111727	F _(1,4)	6,834 0.0794	4,511 0.1237	3,511297 0.221666	3,302008 0.23245
р	0,1269 0,7453	4,916 0,1133	1,593704 0,385549	7,950427 0,111727	F _(1,4) p	6,834 0,0794	4,511 0,1237	3,511297 0,221666	3,302008 0,23245
F _(1,4) p	0,1269 0,7453 σ_{max} :	4,916 0,1133 σ _{max} :	1,593704 0,385549	7,950427 0,111727	F _(1,4) p	6,834 0,0794	4,511 0,1237 σ _{max} :	3,511297 0,221666	3,302008 0,23245
F _(1,4) p	0,1269 0,7453 σ_{max} : $f(q_{En})$	4,916 0,1133 σ_{max} : $f(q_{Fc})$	1,593704 0,385549 q_{RMS} : $f(\sigma_{max})$	7,950427 0,111727	F _(1,4) p	6,834 0,0794 σ_{max} : $f(q_{Fn})$	4,511 0,1237 σ_{max} : $f(q_{Fc})$	3,511297 0,221666 q_{RMS} : $f(\sigma_{max})$	3,302008 0,23245
F _(1,4) p	0,1269 0,7453 σ_{max} : $f(q_{Fn})$ 0,809	$\begin{array}{c} 4,916 \\ 0,1133 \\ \hline \sigma_{max}: \\ f(q_{Fc}) \\ 0,89644 \end{array}$	$\begin{array}{c} 1,593704 \\ 0,385549 \\ \hline \\ q_{RMS}: \\ f(\sigma_{max}) \\ 0,93235 \\ \end{array}$	7,950427 0,111727	F _(1,4) p	6,834 0,0794 σ_{max} : $f(q_{Fn})$ 0,9355	4,511 0,1237 σ _{max} : f(q _{Fc}) 0,97749	$\begin{array}{c} 3,511297 \\ 0,221666 \\ \hline \\ q_{RMS}: \\ f(\sigma_{max}) \\ 0,98503 \end{array}$	<u>3,302008</u> 0,23245
R R R ²	$\begin{array}{c} 0,1269\\ 0,7453\\ \hline \sigma_{max}:\\ f(q_{Fn})\\ 0,809\\ 0,6545\\ \end{array}$	$\begin{array}{c} 4,916\\ 0,1133\\ \hline\\ f(q_{Fc})\\ 0,89644\\ 0,80361\\ \end{array}$	$\begin{array}{c} 1,593704\\ 0,385549\\ \hline \\ q_{RMS}:\\ f(\sigma_{max})\\ 0,93235\\ 0.86927\\ \end{array}$	7,950427 0,111727	$\begin{array}{c} F_{(1,4)} \\ p \\ \hline \\ R \\ R^2 \end{array}$	6,834 0,0794 $\sigma_{max}:$ $f(q_{Fn})$ 0,9355 0,8752	4,511 0,1237 σ _{max} : f(q _{Fc}) 0,97749 0,95548	3,511297 0,221666 <i>q_{RMS}:</i> <i>f</i> (σ _{max}) 0,98503 0,97029	3,302008 0,23245
$\frac{F_{(1,4)}}{p}$ $\frac{R}{R^2}$ $\frac{R^2}{R^2 skor}$	$\begin{array}{c} 0,1269\\ 0,7453\\ \hline \sigma_{max}:\\ f(q_{Fn})\\ 0,809\\ 0,6545\\ 0,5394\\ \end{array}$	$\begin{array}{c} 4,916\\ 0,1133\\ \hline\\ \sigma_{max}:\\ f(q_{Fc})\\ 0,89644\\ 0,80361\\ 0,73815\\ \end{array}$	$\begin{array}{c} 1,593704\\ 0,385549\\ \hline\\ q_{RMS};\\ f(\sigma_{max})\\ 0,93235\\ \hline\\ 0,86927\\ 0,73855\\ \end{array}$	7,950427 0,111727	$\frac{F_{(1,4)}}{p}$ $\frac{R}{R^2}$ $\frac{R^2}{R^2 \text{ sker}}$	$\begin{array}{c} 6,834\\ 0,0794\\ \hline\\ \sigma_{max}:\\ f(q_{Fn})\\ 0,9355\\ 0,8752\\ 0,8335\\ \end{array}$	$\begin{array}{c} 4,511\\ 0,1237\\ \hline\\ \sigma_{max}:\\ f(q_{Fc})\\ 0,97749\\ 0,95548\\ 0,94064\\ \end{array}$	3,511297 0,221666 <i>q_{RMS}:</i> <i>f</i> (σ _{max}) 0,98503 0,97029 0,94058	3,302008 0,23245
$\frac{F_{(1,4)}}{p}$ $\frac{R}{R^2}$ $\frac{R^2}{R^2}$ $\frac{R^2}{F_{(1,4)}}$	$\begin{array}{c} 0,1269\\ 0,7453\\ \hline\\ \sigma_{max}:\\ f(q_{Fn})\\ 0,809\\ 0,6545\\ 0,5394\\ \hline\\ 5,6838\\ \end{array}$	4,916 0,1133 σ _{max} : f(q _{Fc}) 0,89644 0,80361 0,73815 12,27570	$\begin{array}{c c} 1,593704\\ \hline 0,385549\\ \hline q_{RMS};\\ f(\sigma_{max})\\ \hline 0,93235\\ \hline 0,86927\\ \hline 0,73855\\ \hline 6 & 6,64976\\ \hline \end{array}$	7,950427 0,111727	$\begin{array}{c} F_{(1,4)} \\ p \end{array}$ $\begin{array}{c} R \\ R^2 \\ R^2_{skor.} \\ F_{(1,4)} \end{array}$	$\begin{array}{c} 6,834\\ 0,0794\\ \hline\\ \sigma_{max}:\\ f(q_{Fn})\\ 0,9355\\ 0,8752\\ 0,8335\\ 21,0297\\ \end{array}$	$\begin{array}{c} 4,511\\ 0,1237\\ \hline\\ \sigma_{max}:\\ f(q_{Fc})\\ 0,97749\\ 0,95548\\ 0,94064\\ 64,38668\\ \end{array}$	3,511297 0,221666 <i>q_{RMS}:</i> <i>f</i> (σ _{max}) 0,98503 0,97029 0,94058 32,66055	3,302008 0,23245
$\begin{array}{c} F_{(1,4)} \\ p \end{array}$ $\begin{array}{c} R \\ R^2 \\ R^2 \\ skor. \\ F_{(1,4)} \\ p \end{array}$	0,1269 0,7453 σ _{max} : f(q _{Fn}) 0,809 0,6545 0,5394 5,6838 0,0973	$\begin{array}{c} 4,916\\ 0,1133\\ \hline\\ \sigma_{max}:\\ f(q_{Fc})\\ 0,89644\\ 0,80361\\ 0,73815\\ 12,2757\\ 0,03938\\ \end{array}$	$\begin{array}{c} 1,593704\\ 0,385549\\ \hline\\ q_{RMS};\\ f(\sigma_{max})\\ 0,93235\\ 0,86927\\ 0,73855\\ \hline\\ 6 & 6,64976\\ 0,13072\\ \end{array}$	7,950427 0,111727	$ \begin{array}{c} F_{(1,4)} \\ p \\ \hline R \\ R^2 \\ R^2 \\ R^2 \\ skor. \\ F_{(1,4)} \\ p \\ \end{array} $	6,834 0,0794 σ _{max} : f(q _{Fn}) 0,9355 0,8752 0,8335 21,0297 0,0195	$\begin{array}{c} 4,511\\ 0,1237\\ \hline\\ \sigma_{max}:\\ f(q_{Fc})\\ 0,97749\\ 0,95548\\ 0,94064\\ 64,38668\\ 0,00404\\ \end{array}$	3,511297 0,221666 <i>q_{RMS}:</i> <i>f</i> (σ _{max}) 0,98503 0,97029 0,94058 32,66055 0,02971	3,302008 0,23245
$ \begin{array}{c} F_{(1,4)} \\ p \\ \\ \hline \\ R \\ R^2 \\ R^2 \\ skor. \\ \hline \\ F_{(1,4)} \\ p \\ \\ \end{array} $	$\begin{array}{c} 0,1269\\ 0,7453\\ \hline\\ \sigma_{max}:\\ f(q_{Fn})\\ 0,809\\ 0,6545\\ 0,5394\\ 5,6838\\ 0,0973\\ \hline\end{array}$	$\begin{array}{c} 4,916\\ 0,1133\\ \hline\\ \sigma_{max}: f(q_{Fc})\\ 0,89644\\ 0,80361\\ 0,73815\\ 12,2757\\ 0,03938\\ \end{array}$	$\begin{array}{c} 1,593704\\ 0,385549\\ \hline\\ q_{RMS};\\ f(\sigma_{max})\\ 0,93235\\ 0,86927\\ 0,73855\\ 6\\ 6,64976\\ 0,13072\\ \end{array}$	7,950427 0,111727	$ \begin{array}{c} F_{(1,4)} \\ p \\ \hline \\ R \\ R^2 \\ R^2_{skor.} \\ F_{(1,4)} \\ p \\ \end{array} $	6,834 0,0794 σ _{max} : f(q _{Fn}) 0,9355 0,8752 0,8335 21,0297 0,0195	$\begin{array}{c} 4,511\\ 0,1237\\ \hline\\ \sigma_{max}:\\ f(q_{Fc})\\ 0,97749\\ 0,95548\\ 0,94064\\ 64,38668\\ 0,00404\\ \end{array}$	3,511297 0,221666 <i>q_{RMS}:</i> <i>f</i> (σ _{max}) 0,98503 0,97029 0,94058 32,66055 0,02971	3,302008 0,23245

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Z przedstawionych do tej pory analiz statystycznych wynika ponadto, że najlepsze korelacje wskaźników średniego obciążenia jednostkowego warstwy wierzchniej z naprężeniami uzyskano dla sygnału EA (tab. 4.8.70, D236). Powyższe zestawienie otrzymanych współczynników korelacji świadczy o wyższości źródeł EA pod względem efektywnego wykorzystania do opisu przebiegu i wyników procesu szlifowania. Wartości współczynników korelacji występujące przy wielkościach związanych z sygnałem EA są wyższe (lub co najmniej równe) od współczynników dla składowych siły szlifowania.

Oznacza to, że wybrane parametry sygnału EA emitowanego w strefie szlifowania, w przyjętych warunkach badań stanowiły korzystniejszy wskaźnik monitorowania/oceny procesu szlifowania ściernicami elektrokorundowymi w odniesieniu do CPS oraz właściwości warstwy wierzchniej (szczególnie w nawiązaniu do naprężeń), niż składowe siły szlifowania (w tym ich pochodne: q_{Fc} oraz q_{Fn}).

Wnioski z analizy korelacji pomiędzy sygnałem EA, a naprężeniami w warstwie wierzchniej materiału szlifowanego

W badaniach udowodniono istnienie ścisłego związku pomiędzy zmianami CPS, a parametrami sygnału EA. Ponieważ zmiany CPS bezpośrednio oddziaływają na jakość otrzymywanych powierzchni szlifowanych, udowodniono także istnienie częściowej korelacji w związku *sygnał EA - powierzchnia obrabiana*. Jednakże, w tym przypadku silniejszą współzależność otrzymano ze zmianami zachodzącymi w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego (związek z naprężeniami), niż w przypadku odniesienia sygnałów emisji akustycznej do czysto geometrycznych zmian na powierzchni próbek.

Analiza wyników badań wykazała istnienie wysokiej korelacji pomiędzy rejestrowanymi w trakcie przebiegu procesu szlifowania sygnałami EA, a otrzymanymi naprężeniami zalegającymi w warstwie wierzchniej przedmiotów obrabianych. Wynika to z faktu istnienia ścisłej zależności sygnału od obciążenia strefy szlifowania, w tym głównie od stanu CPS, określonej we wcześniejszych badaniach. Wyniki badań, a szczególnie wysokie wartości współczynników korelacji *R* dla parametrów związanych z rozkładem *beta*: $K_{\beta}(EA_{RMS})$ oraz $S_{k\beta}(EA_{RMS})$, wyraźnie wskazują na możliwość prognozowania naprężeń w warstwie wierzchniej elementów obrabianych za pomocą analizy wartości sygnału emisji akustycznej oraz ominięcie konieczności przerywania procesu i wykonywania pomiarów naprężeń, będących pomiarami niszczącymi (np. poprzez trawienie materiału).

Wysoka zbieżność pomiędzy wartością skuteczną emisji akustycznej, a naprężeniami własnymi w warstwie wierzchniej szlifowanych przedmiotów oraz czasem pracy ściernicy w postaci opracowanej funkcji $K_{\beta}(EA_{RMS}) = f(\sigma_{max}, t)$, wskazuje, że uogólniona postać modelu z powodzeniem może zostać praktycznie wykorzystana do diagnozowania stanu narzędzia w procesie szlifowania. Zastosowanie odpowiednich metod przetwarzania sygnału EA, powinno pozwolić na wykorzystanie otrzymanych zależności w systemie diagnostyki przebiegu procesu szlifowania, uzupełniając go o możliwość przewidywania wartości naprężeń, a tym samym zminimalizowanie ryzyka otrzymania niepożądanych rezultatów obróbki w postaci materiałów o niewłaściwych własnościach fizycznych.

Ponadto, w porównaniu do składowych siły szlifowania, parametry sygnałów EA emitowanych ze strefy kontaktu, czyli pochodzące od CPS oraz odkształcanej warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego, wykazały korelacje, które świadczą o ich większej czułości, jako miernika zmian zachodzących w trakcie trwania procesu. Oznacza to, że składowe siły szlifowania znacznie mniej jednoznacznie korelują z naprężeniami własnymi w warstwie wierzchniej szlifowanym przedmiotów.

Jakościowo wyższa zależność $q_{RMS} = f(\sigma_{max})$, niż między wskaźnikami jednostkowego obciążenia składowymi siły szlifowania, a maksymalnymi naprężeniami własnymi w warstwie wierzchniej, wynikała najprawdopodobniej z faktu, że EA ujmuje więcej czynników mających wpływ na ostateczne kształtowanie się wyników obróbki. Wskaźnik q_{RMS} , w przeciwieństwie do q_{Fc} i q_{Fn} , nie koncentruje się na makrogeometrycznych zmianach CPS (parametr B_{kr}), lecz znacznie pełniej oddaje charakter zmian zachodzących w strefie obróbki.

Wykazane korelacje EA z naprężeniami, a szczególnie istotność statystyczna wybranych parametrów sygnału EA, stanowi podstawę do prognozowania wpływu procesów zachodzących podczas obróbki na właściwości warstwy wierzchniej. Monitorowanie sygnałów EA, pochodzących ze strefy szlifowania, pozwala na uzyskanie istotnych informacji o zachodzących z upływem czasu zmianach na CPS, które to mają znaczący wpływ na wielkość i charakter oddziaływania ściernicy na warstwę wierzchnią przedmiotu obrabianego, a tym samym na rodzaj i wielkość kumulowanych w materiale szlifowanym naprężeń.

Współczynniki energetyczne sygnału EA

Z przeprowadzonych dotychczas badań i analiz, wynika jednoznacznie, że relacje pomiędzy czynnikami wyjściowymi procesu szlifowania zwykle nie posiadają charakteru prostoliniowego. Dlatego też, postanowiono sprawdzić korelacje pomiędzy wybranymi parametrami w oparciu o ich przekształcone wartości.

W tym celu przeanalizowano nieliniowe modele obiektów badań. Za model matematyczny nieliniowego obiektu, zgodnie z zaleceniem [Kuk2002] przyjęto funkcję wykładniczą w postaci:

$$\hat{\overline{y}} = e^{\hat{\overline{Y}}_1(x_i, b_j)},$$
(4.8.33)

gdzie za $\hat{Y}_1(x_i, b_j)$ przyjęto obiekty główne badań powiązane z sygnałem emisji akustycznej:

- średnią wartość skuteczną sygnału oraz jego wariancję: EA_{RMS} , $s^2(EA_{RMS})$,
- natężenie koncentracji sygnału wokół wartości średniej: $m_4(EA_{RMS})$, $K(EA_{RMS})$,
- parametry rozkładu *beta*: $K_{\beta}(EA_{RMS})$ oraz $S_{k\beta}(EA_{RMS})$.

W ten sposób sporządzono obiekty, które nazwano parametrami energetycznymi (gdyż odnoszą się bezpośrednio do parametrów statystycznych wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej, a ta z kolei stanowi pochodną energetyczną sygnału EA).

Przyjęty model, tzw. eksponenta, stanowi szczególny przypadek funkcji wykładniczej o podstawie równej *e* (czyli podstawie logarytmu naturalnego). Cechą tej funkcji jest to, że jej pochodna jest równa jej samej:

$$\left(e^{x}\right)^{'} = e^{x}. \tag{4.8.34}$$

Pochodna funkcji w analizie matematycznej służy, jako narzędzie do badania przebiegu zmienności wartości funkcji, określonej w pewnym przedziale o wartościach rzeczywistych, przy zmianie jej argumentów. Dlatego też, pochodną funkcji można uważać za liczbową charakterystykę szybkości wzrostu danej funkcji (duża pochodna – stromy wykres, niewielka pochodna – wykres łagodnie wznoszący się, ujemna pochodna – wykres opadający, itd.) [BS1997]. Z powyższych powodów, wybraną funkcję należy traktować jako optymalną do analiz wyników badań.

Opierając się na zależności 4.8.33 (D238) zbudowano nieliniowe obiekty badań powiązane z sygnałem emisji akustycznej, które przyjęły poniższe postacie:

$$\hat{\overline{y}}_{EA_{RMS}} = e^{EA_{RMS}}$$
, (4.8.35)

$$\hat{\overline{y}}_{s^2} = e^{s^2(EA_{RMS})},$$
(4.8.36)

$$\hat{y}_{m_4} = e^{m_4(EA_{RMS})},$$
(4.8.37)

$$\hat{y}_{K} = e^{K(EA_{RMS})},$$
 (4.8.38)

$$\hat{\overline{y}}_{K_{\beta}} = e^{K_{\beta}(EA_{RMS})}, \qquad (4.8.39)$$

oraz
$$\hat{\overline{\gamma}}_{S_{k\beta}} = e^{S_{k\beta}(EA_{RMS})}$$
. (4.8.40)

Na poniżej zamieszczonych wykresach zaprezentowano wybrane przebiegi opracowanych obiektów badań w funkcji czasu pracy ściernicy (rys. 4.8. – 4.8.49, $\Box 239 - 241$). Duża zmienność lokalnych punktów modelu odnoszącego się do średniej wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej ($\hat{y}_{EA_{RMS}}$), wywołała brak globalnej tendencji zmian w całym zarejestrowanym przedziale czasu pracy ściernic. Oznacza to, że przedstawiony deskryptor nie znajduje bezpośredniego zastosowania w opisie zmian zachodzących w CPS, a szczególnie nie nadaje się do zastosowania, jako wskaźnik utraty zdolności skrawnej ściernicy.



Rys. 4.8.45. Zmiany nieliniowego modelu ($\hat{y}_{EA_{RMS}} = e^{EA_{RMS}}$) odnoszącego się do średniej wartości skutecznej sygnału EA zarejestrowanego w funkcji czasu pracy ściernic

Kolejne dwa modele (\hat{y}_{s^2} i bliźniaczy \hat{y}_{m_4}) posiadają zbliżony ogólny charakter zmian w domenie czasu pracy ściernicy. Różnią się one jedynie skalą obserwowanych zmian w lokalnych punktach. Ich charakterystyczną cechą jest gwałtowny spadek wartości w początkowej fazie pracy ściernicy, po czym następujące zmienności mieszczą się w stałym paśmie wartości bez szczególnego trendu zmian. Brak wyraźnej tendencji zmian wartości rozpatrywanych modeli w funkcji czasu pracy ściernic uniemożliwia ocenę zdolności skrawnej czynnej powierzchni ściernicy z ich wykorzystaniem.



Rys. 4.8.46. Zmiany nieliniowego modelu odnoszącego się do wariancji wartości EA_{RMS} zarejestrowanego w funkcji czasu pracy ściernic ($\hat{y}_{s^2} = e^{s^2(EA_{RMS})}$)

Także modele odnoszące się do spłaszczenia rozkładu wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej (\hat{y}_{K} oraz $\hat{y}_{K_{\beta}}$) nie wykazały dużej przydatności w ocenie zdolności skrawnej ściernic.

Wynika to przede wszystkim z dużej różnicy (sięgającej 11. rzędu wielkości), jaka istnieje między wartościami zarejestrowanymi dla ściernicy ostrej (tuż po zabiegu obciągania), a wartościami rejestrowanymi w późniejszym okresie czasu – załącznik, rozdz. Z.4.3.5.



Rys. 4.8.47. Zmiany nieliniowego modelu odnoszącego się do momentu 4. rzędu sygnału EA zarejestrowanego w funkcji czasu pracy ściernic ($\hat{y}_{m_4} = e^{m_4(EA_{RMS})}$)

Powyższe uwagi dotyczą przede wszystkim modelu odnoszącego się do koncentracji rozkładu sygnału EA, ponieważ dla modelu odnoszącego się do parametru kurtoza rozkładu *beta* sygnału EA, z racji zaistnienia przeciwnych zmian, można mówić o ewentualnej możliwości wyznaczenia momentu całkowitej utraty zdolności skrawnej. Wtedy to następuje gwałtowny i bardzo silny wzrost wartości. Powyższe wyniki stanowią kolejny dowód przemawiający na korzyść odniesienia sygnału EA do parametrów rozkładu *beta*.



Rys. 4.8.48. Zmiany nieliniowego modelu odnoszącego się do parametru kurtoza rozkładu *beta* dla sygnału EA ($\hat{y}_{K\beta} = e^{K_{\beta}(EA_{RMS})}$) zarejestrowanego w funkcji czasu pracy ściernic

Najlepszym modelem, którego bezpośrednia analiza może z powodzeniem posłużyć do opisu zmian zachodzących w strefie szlifowania, a w szczególności do określenia aktualnego stanu CPS i momentu utraty zdolności skrawnej w trakcie przebiegu procesu szlifowania, okazał się model odniesiony do asymetrii rozkładu *beta* sygnału EA ($\hat{y}_{S_{k\beta}}$) – co ilustruje rys. 4.8.49 (\Box 241). O użyteczności powyższego deskryptora, który można wyznaczyć z sygnału EA bez zatrzymywania procesu obróbki, świadczy jego trend zmian silnie nawiązujący do zmian odnotowanych dla parametru opisującego utratę zdolności skrawnej przez czynną powierzchnię ściernicy (K_{CPS}).



Rys. 4.8.49. Zmiany nieliniowego modelu odnoszącego się do asymetrii/skośności rozkładu *beta* dla sygnału EA ($\hat{y}_{S_{k\beta}} = e^{S_{k\beta}(EA_{RMS})}$) zarejestrowanego w funkcji czasu pracy ściernic

Sygnał charakteryzuje się spadkiem wartości w skali czasu pracy ściernicy, co odpowiada charakterowi zmian geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej. Dodatkowo przebieg zmienności opisywanego deskryptora można podzielić na 3 zasadnicze etapy:

- szybki spadek wartości w początkowej fazie pracy ściernicy, wynikający najprawdopodobniej z utraty ziaren osłabionych w zabiegu obciągania,
- utrzymywanie wartości na zbliżonym poziomie w przypadku zaistnienia odpowiednich warunków pracy ściernicy, świadczące o zachowaniu przez narzędzie zdolności skrawnej wystarczającej do inicjowania kolejnych zabiegów usuwania materiału obrabianego,
- oraz ostatni etap ponownie charakteryzujący się spadkiem rejestrowanych wartości analizowanego deskryptora do wartości granicznej, która wyznacza okres trwałości narzędzia, czyli całkowitą utratę jego zdolności skrawnej.

Ponadto, w wybranych przedziałach czasowych, sygnał $\hat{y}_{S_{k\beta}}$ charakteryzował się miejscowymi wzrostami wartości, które mogą świadczyć (podobnie jak w przypadku parametru K_{CPS}), że w danym momencie ściernica pracowała z tendencją do samoostrzenia.

Omawiany parametr może posłużyć do bezwarunkowego określenia okresu trwałości ściernicy, poprzez wyznaczenie wartości granicznej (w tym przypadku minimum globalnego), której osiągnięcie lub przekroczenie przez rejestrowany sygnał przyniesie efekt w postaci przekazania do systemu kontroli przebiegu procesu informacji o konieczności wymiany ściernicy lub ewentualnie potrzebie odnowienia jej CPS poprzez zabieg obciągania.

Ponieważ opracowane nieliniowe modele obiektów badań, jakimi są deskryptory sygnału emisji akustycznej, wykazały lokalne zmiany wartości oraz charakteryzowały się ogólnymi trendami zmian w funkcji czasu pracy ściernicy, zdecydowano się przeprowadzić analizę powiązania wyróżniających się parametrów (\hat{y}_{m_4} oraz $\hat{y}_{S_{k\beta}}$) z czynnikami wyjściowymi procesu szlifowania odnoszącymi się do geometrycznych zmian CPS (K_{CPS} , l_{st} , B_{kr}) oraz ich skutków, czyli geometryczno-fizycznych zmian warstwy wierzchniej przedmiotów poddanych obróbce w trakcie badań eksperymentalnych ($R_{a(w)}, RS_{m(w)}$ i σ_{max}).

Tab. 4.8.71. Zależność geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej ściernicy (K_{CPS}) w funkcji nieliniowego modelu odnoszącego się do momentu 4. rzędu sygnału EA ($\hat{y}_{m_4} = e^{m_4(EA_{RMS})}$)



Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

T1-250x32x98-9 NC10 (60 \pm 2) HI $f_a = 0.3$ [mm/skc	0,03 [mm], 1]	T1-250x32x98-9 NC10 (60 \pm 2) HF $f_a = 0.3$ [mm/sko	9A60M7V- RC, $v_s = 27$, k], $Q_c = 3 \times$	-42 m/s, 5 [m/s], $a_e =$ $10^{-3} \text{ [m^3min^{-1}]}$	0,03 [mm], 1]			
		-	-	$v_{ft} = 14$	[m/min]			-
0,30 0,25 0,20 0,15 0,15 0,10 0,05 0,1 1,		1,006 1,0 e ^{m4[EARMS]}	□ pow ○ pow △ pow 08 1,010	0,35 0,30 0,25 0,20 0,15 0,10 0,05 1,1	005 1,010	1,015 1,0 e ^{m4(EARMS)}	powt. 1 powt. 2 powt. 3 powt. 3 1020 1,025 1,030	
$R_{a(w)(l)} = 248,675-5$	513,808· $e^{m_4(}$ współ. 248,675	$t_{(11)}^{(11)} + 265,2$	$232 \cdot \left(e^{m_4 \left(EA_{RME}\right)}\right)$	$\binom{1}{(1)}^{2}$	$R_{a(w)(l)} = -21,7201+$ w. wolny	-41,5821· e ^{m2} współ. -21,7201	$t_{(13)}^{(EA_{RMS})}$ -19,7 $t_{(13)}^{(1)}$ -0,037839	$548 \cdot \left(e^{m_4(EA_{_{RMS}})}_{(1)}\right)^2$ poziom p 0,970391
$e^{m_4(EA_{_{RMS}})}$ (1)	-513,808	-0,060798	0,952611		$e^{m_4(EA_{_{RMS}})}$ (1)	41,5821	0,036597	0,971362
$\left(e^{m_4\left(EA_{_{RMS}}\right)}\right)^2$	265,232	0,063056	0,950853		$\left(e^{m_4\left(\textit{EA}_{\tiny RMS}\right)}\right)^2$	-19,7548	-0,035137	0,972504
$R_{a(w)(2)} = 1775, 7-35$	$533,22 \cdot e^{m_4(E)}$	(2) +1757,	$61 \cdot \left(e^{m_4 \left(EA_{RMS} \right)} \right)$	$\binom{1}{(2)}^{2}$	$R_{a(w)(2)} = 1011,65-2$	$011,31 \cdot e^{m_4}$	(EA_{RMS}) +999,7	$78 \cdot \left(e^{m_4(EA_{RMS})}\right)^2$
w. wolny	współ. 1775.7	$t_{(11)}$ 1.32142	0.213186		w. wolny	współ. 1011.65	t ₍₁₃₎ 0.717112	poziom p 0.485991
$e^{m_4(EA_{RMS})}$	-3533,22	-1,32251	0,212835		$e^{m_4(EA_{RMS})}$	-2011,31	-0,71852	0,485151
$\left(e^{m_4\left(EA_{_{RMS}}\right)}\right)^2$	1757,61	1,32366	0,212467		$\left(e^{m_4\left(EA_{_{RMS}}\right)}\right)^2$	999,78	0,720022	0,484257
$R_{a(w)(3)} = 14445, 4-2$ w. wolny $e^{m_4(EA_{RMS})}$ (3) $\left(e^{m_4(EA_{RMS})}\right)^2$	28836,6· <i>e</i> ^{m4(.} współ. 14445,4 -28836,6 14391,4	EA_{RASS}) +1435 (3) +1435 (11) 0,951207 -0,95191 0,952623	$\begin{array}{c} p_{1,4} \cdot \left(e^{m_4 (EA_{RA})} \right) \\ poziom p \\ 0,361932 \\ 0,361590 \\ 0,361245 \end{array}$	$\binom{s}{(3)}^{2}$	$R_{a(w)(3)} = 131,071-2$ w. wolny $e^{m_4(EA_{RMS})}$ (3) $\left(e^{m_4(EA_{RMS})}\right)^2$	67,474 · <i>e^{m₄(}</i> współ. 131,071 -267,474 136,49	$ \begin{array}{c} {}^{EA_{RBS}} \\ (3) \\ +136, 2 \\ \hline \\ (1) \\ 0,537139 \\ -0,554985 \\ \hline \\ 0,573607 \end{array} $	$49 \cdot \left(e^{m_4(EA_{gus})}_{(3)}\right)^2$ poziom p 0,600245 0,588328 0,576023
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	$ \begin{array}{c} (w)(l)^{2} \\ (EA_{RMS}) \\ (1) \end{array} \right) f \\ \hline 98 & 0 \\ 991 & 0 \\ 008 & 0 \\ 008 & 0 \\ 054 & 1 \\ 143 & 0 \\ \end{array} $	$\begin{array}{c} R_{a(w)(2)}:\\ \left(e^{m_{4}\left(EA_{RMS}\right)}\right)\\ (2)\\ (485234)\\ (235452)\\ (395452)\\ (396444)\\ (693797)\\ (228415)\end{array}$	$\begin{array}{c} R_{a(w)(\ell)} \\ f\left(e^{m_{4}\left(EA\right)} \\ 0.465402 \\ 0.216599 \\ 0.074162 \\ 1.520667 \\ 0.261164 \end{array}\right)$	(3)	$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	$\begin{array}{c} \frac{1}{W(l)} \\ \frac{1}{EA_{RUS}} \\ (1) \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} f \\ f \\ g \\$	$\begin{array}{c} R_{a(w)(2)}:\\ (e^{m_4(EA_{RBG})})\\ (2)\\ 0,356377\\ 0,127005\\ 0,007302\\ 0,945631\\ 0,413597\\ \end{array}$	$\begin{array}{c} R_{a(w)(3)} \\ f\left(e^{m_4\left(EA_{RBS}\right)}\right) \\ 0,81614 \\ 0,66608 \\ 0,61471 \\ 12,96591 \\ 0,00080 \end{array}$

Tab. 4.8.72. Zmiany średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości powierzchni próbek ($R_{a(w)}$) w funkcji nieliniowego modelu odnoszącego się do momentu 4. rzędu sygnału EA ($\hat{y}_{m_4} = e^{m_4(EA_{RMS})}$)

Wyniki analiz, w postaci wyznaczonych funkcji dopasowania oraz parametrów statystycznych regresji, przedstawiono w tablicach 4.8.71 – 4.8.80 ($\Box 242 - 251$). Pojawiające się w wybranych warunkach badań (szczególnie dla $v_{ft} = 14$ m/min) wysokie wartości współczynników korelacji (*R*), świadczyć mogłyby o dobrym dopasowaniu przebiegu porównywanych parametrów wyjściowych procesu szlifowania. Jednakże pełna analiza statystyczna wykazała, że istniejące korelacje są zbyt słabe by można było je uznać za znaczące.

Tab. 4.8.73. Zmiany wartości starcia względnego wzniesień profilu (l_{st}) w funkcji nieliniowego modelu odnoszącego się do momentu 4. rzędu sygnału EA ($\hat{y}_{m_4} = e^{m_4(EA_{RMS})}$)



Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

T1-250x32x98-9 NC10 (60 \pm 2) HR	2m/s, 5 [m/s], $a_e = 0$	0,03 [mm],		T1-250x32x98-9 NC10 (60 \pm 2) HR	9A60M7V $RC, v_s = 27$	f-42m/s, 5 [m/s], $a_e =$	0,03 [mm],	
$J_a = 0,3$ [IIIII/SKO	K], $Q_c = 5 \times 1$		$v_{\theta} =$	14	$J_a = 0.3$ [mm/sko	$K_{\rm J}, Q_{\rm c} = 5$]
			- ji		[]			
		1,006 1,008	□ powt. 1 ○ powt. 2 △ powt. 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0			5 1,010	1,015 1,0 e ^{m4[EARMS]}	powt. 1 powt. 2 powt. 3 powt. 3 20 1,025 1,030
$B_{kr(l)} = -10279,7+2$	$0840,6 \cdot e^{m_4(E)}$	(1) -10557,	$4 \cdot \left(e^{m_4(EA_{RMS})}\right)^2$		$B_{kr(l)} = -33728 + 668$	$359,9 \cdot e^{m_4(E)}$	⁴ _{RMS}) -33130,0	$5 \left(e^{m_4(EA_{_{RMS}})} \right)^2$
	współ.	t ₍₁₁₎	poziom p			współ.	t ₍₁₃₎	poziom p
w. wolny	-102/9,7	-0,097880	0,923789		w. wolny	-33/28	-1,81949	0,091935
$e^{m_4(EA_{RMS})}$ (1)	20840,6	0,099672	0,922398		$e^{m_4(EA_{RMS})}$ (1)	66859,9	1,82218	0,091505
$\left(e^{m_4\left(EA_{_{RMS}}\right)}\right)^2$	-10557,4	-0,101445	0,921022		$\left(e^{m_4\left(EA_{_{RMS}}\right)}\right)^2$	-33130,6	-1,82478	0,091092
$B_{kr(2)} = -68658 + 136$	$5793,9 \cdot e^{m_4(E)}$	$(2)^{4_{RMS}}$ -68133,	$4 \cdot \left(e^{m_4(EA_{RMS})}\right)^2$		$B_{kr(2)} = -32686,2+6$	4987,6 $\cdot e^{m_4}$	(<i>EA</i> _{RMS}) (2) -3229	$9,5 \cdot \left(e^{m_4(EA_{RMS})}\right)^2$
	współ.	t ₍₁₁₎	poziom p			współ.	t ₍₁₃₎	poziom p
w. wolny	-68658	-0,715974	0,488928		w. wolny	-32686,2	-1,09030	0,295379
$e^{m_4(EA_{RMS})}$ (2)	136793,9	0,717513	0,488015		$e^{m_4(EA_{RMS})}$ (2)	64987,6	1,09248	0,294453
$\left(e^{m_4\left(EA_{_{RMS}}\right)}\right)^2$	-68133,4	-0,719029	0,487117		$\left(e^{m_4\left(EA_{_{RMS}}\right)}\right)^2$	-32299,5	-1,09461	0,293553
$B_{kr(3)} = -555024 + 11$	$107675 \cdot e^{m_4(E)}$	^{EA} _{RMS}) -55265	$0 \cdot \left(e^{m_4\left(EA_{_{RMS}}\right)}_{(3)}\right)^2$		$B_{kr(3)} = 1271,24-24$	$09,07 \cdot e^{m_4(E)}$	$(3)^{(A_{RMS})}$ +1140,	$82 \cdot \left(e^{m_4(EA_{RMS})}\right)^2$
	współ.	t ₍₁₁₎	poziom p			współ.	t ₍₁₃₎	poziom p
w. wolny	-555024	-0,84821	0,414395		w. wolny	1271,24	0,243592	0,811349
$e^{m_4(EA_{RMS})}$ (3)	1107675	0,848618	0,414180		$e^{m_4(EA_{RMS})}$ ⁽³⁾	-2409,07	-0,23372	0,818839
$\left(e^{m_4\left(EA_{_{RMS}}\right)}_{(3)}\right)^2$	-552650	-0,84901	0,413967		$\left(e^{m_4\left(EA_{_{RMS}}\right)}_{(3)}\right)^2$	1140,82	0,224175	0,826106
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	$ \begin{array}{c} F(I):\\ EA_{RAS} \\ (1) \\ \hline 20 \\ 46 \\ 45 \\ 77 \\ 1 \\ 74 \\ 0 \\ \end{array} \right) f $	$B_{kr(2)}:$ $\left(e^{m_{4}(EA_{RMS})}\right)$ (2) $($	$\begin{array}{c} B_{kr(3)}:\\ f\left(e^{m_{s}(EA_{RMS})}\right)\\ 0,334949\\ 0,112191\\ -0,049229\\ 0,695024\\ 0,519707\\ \end{array}$)	$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	$ \begin{array}{c} r(l):\\ EA_{RMS} \\ (1) \end{array} \\ \begin{array}{c} j \\ j \\ 47 \\ 83 \\ 96 \\ 96 \\ 86 \end{array} $	$B_{kr(2)}:$ $f\left(e^{m_{s}(EA_{RMS})}\right)^{(2)}$ 0,482847 0,233141 0,115163 1,976135 0,178095	$ \begin{array}{c} B_{kr(3)}:\\ f\left(e^{m_{4}\left(EA_{RBG}\right)}_{(3)}\right)\\ \hline 0,585691\\ 0,343034\\ 0,241962\\ \hline 3,393966\\ 0,065167 \end{array} $
$\begin{bmatrix} F_{kr(2,11)} &= 3,98\\ t_{kr(0,05;11)} &= 2,2010 \end{bmatrix}$	erwonym ozn	aczono param	-try/współczynniki	reg	$F_{kr(2,13)} = 3,81$ $t_{kr(0,05;13)} = 2,1604$	totne dla prz	wietego pozior	nu istotności $\alpha = 0.05$

Tab. 4.8.74. Zmiany wartości długości czynnej krawędzi ściernicy (B_{kr}) w funkcji nieliniowego modelu odnoszącego się do momentu 4. rzędu sygnału EA ($\hat{y}_{m_4} = e^{m_4(EA_{RMS})}$)

Ponadto, w przypadku wszystkich rozpatrywanych w tym miejscu czynników wyjściowych procesu szlifowania (K_{CPS} , $R_{a(w)}$, $RS_{m(w)}$, l_{st} , B_{kr} , σ_{max}) zestawionych w funkcji deskryptora nieliniowego powiązanego z centralnym momentem 4. rzędu ($m_4(EA_{RMS})$), w celu zrealizowania obliczeń dla obu zmiennych niezależnych $e^{m_4(EA_{RMS})}$ oraz $(e^{m_4(EA_{RMS})})^2$, zastosowano minimalną tolerancję akceptowaną przez program STATISTICA, rzędu 1×10⁻⁷.

Im mniejsza tolerancja zmiennej, tym bardziej nadmiarowy jest wkład danej zmiennej w równanie regresji (tzn. jest on zbędny w świetle wkładu pozostałych zmiennych). Jeśli tolerancja jakiejś zmiennej w równaniu jest równa zeru (lub bardzo bliska zeru), to równania regresji nie można obliczyć (macierz jest źle uwarunkowana i nie można jej odwrócić). Ponadto, nie zaleca się ustawiania małej tolerancji, ponieważ jeżeli tolerancja zmiennej jest mniejsza niż wartość domyślna (0,01), to zbyteczność tej zmiennej w świetle zmiennych będących już w modelu wynosi 99 procent [Sta2001].



Tab. 4.8.75. Zmiany naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego (σ_{max}) w funkcji nieliniowego modelu odnoszącego się do momentu 4. rzędu sygnału EA ($\hat{y}_{m_4} = e^{m_4(EA_{RMS})}$)

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Oznacza to, że zastosowana bardzo mała tolerancja (w przypadku modelu będącego pochodną momentu 4. rzędu sygnału EA) jest niepewna, nie tylko ze względu na znaczenie wyników, lecz także na to, że współczynniki regresji otrzymane w tych przypadkach są mało wiarygodne. Ponadto, jednoznaczna współzależność miała miejsce tylko w przypadku wyni-

ków statystycznych uzyskanych w trakcie odniesienia opisywanego parametru do geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej ściernicy (K_{CPS}).

Tab. 4.8.76. Zależność geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej ściernicy (K_{CPS}) w funkcji nieliniowego modelu odnoszącego się do skośności rozkładu *beta* dla sygnału EA ($\hat{y}_{S_{k\beta}} = e^{S_{k\beta}(EA_{RMS})}$)



Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

T1-250x32x98-9 NC10 (60 \pm 2) HR $f_a = 0,3$ [mm/sko	9A60J7V-4 C, $v_s = 27,5$ k], $Q_c = 3 \times 1$	2m/s, 5 [m/s], $a_e = 0$ 10 ⁻³ [m ³ min ⁻¹	0,03 [mm],]	T1-250x32x98-9 NC10 (60±2) HF $f_a = 0,3$ [mm/sko	9A60M7V- $C, v_s = 27,5$ k], $Q_c = 3 \times 1$	42 m/s, 5 [m/s], $a_e =$ 10 ⁻³ [m ³ min ⁻	0,03 [mm], 1]
			$v_{ft} = 24$	[m/min]			
0,30 0,25 0,20 0,15 0,10 0,05 0 0 0 0,0,11		0 0,3 0,4 e ^{skp(EARMS)}	□ powt. 1 ○ powt. 2 △ powt. 3 0,5 0,6 0,7	0,35 0,30 0,25 0,25 0,20 0,15 0,10 0,05 0,005	0,10 0,15	5 0,20 0,25 e ^{Skp(EARMS)}	powt. 1 powt. 2 powt. 3 powt. 3 0,30 0,35 0,40
$R_{a(w)(1)} = 0,1902+0,$	$1752 \cdot e^{S_{k\beta}(E)}$	$(1)^{4_{RMS}}$ +1,910	$44 \cdot \left(e^{S_{k\beta}\left(EA_{RMS}\right)}\right)^2$	$R_{a(w)(1)} = 0,14575 + 0$,51391 $\cdot e^{S_{k\beta}}$	(<i>EA_{RMS}</i>) (1) -0,23	$8638 \cdot \left(e^{S_{k\beta}\left(EA_{RMS}\right)}\right)^2$
	współ.	t ₍₆₎	poziom p		współ.	t ₍₁₅₎	poziom p
w. wolny	0,1902	4,757858	0,003133	w. wolny	0,145753	2,915319	0,010658
$e^{S_{k\beta}(EA_{RMS})}$	0,1752	0,213691	0,837865	$e^{S_{k\beta}(EA_{RMS})}$	0,513918	0,877376	0,394118
$\left(e^{S_{k\beta}\left(EA_{RMS}\right)} ight)^{2}$	1,91044	0,516562	0,623942	$\left(e^{S_{k\beta}\left(EA_{RMS}\right)} ight)^{2}$	-0,23638	-0,16872	0,868267
$R_{a(w)(2)} = 0,1368+1,$	7657 $\cdot e^{S_{k\beta}(E)}$	⁴ _{RMS}) (2) -6,8814	$45 \cdot \left(e^{S_{k\beta}\left(EA_{RMS}\right)}\right)^2$	$R_{a(w)(2)} = 0,0856+1,$	$04826 \cdot e^{S_{k\beta}(t)}$	$(2)^{EA_{RMS}}$ -1,04	$064 \cdot \left(e^{S_{k\beta}\left(EA_{RMS}\right)}\right)^{2}$
1	współ.	t ₍₆₎	poziom p		współ.	t ₍₁₅₎	poziom p
$\frac{\text{W. Wolny}}{S_{\text{Vec}}(EA_{\text{Vec}})}$	0,1368	3,650086	0,010705	w. woiny $S_{re}(EA_{res})$	0,0856	2,03798	0,059589
$e^{S_{k\beta}(LARMS)}$ (2)	1,7657	1,459080	0,194827	$e^{S_{k\beta}(ETR_{RMS})}$ (2)	1,04826	2,66132	0,017784
$\left(e^{S_{k\beta}\left(EA_{RMS}\right)}\right)^{2}$	-6,88145	-0,919199	0,393444	$\left(e^{S_{k\beta}\left(EA_{RMS}\right)}\right)^{2}$	-1,04064	-1,55716	0,140277
$R_{a(w)(3)} = 0,1283+1,$	1667 $e^{S_{k\beta}(E)}$	(3) -3,6989	$93 \cdot \left(e^{S_{k\beta}\left(EA_{RMS}\right)}_{(3)}\right)^2$	$R_{a(w)(3)} = 0,09204+0$),9548 $\cdot e^{S_{k\beta}(x)}$	$(3)^{EA_{RMS}}$	$219 \cdot \left(e^{S_{k\beta}\left(EA_{RMS}\right)}\right)^2$
	współ.	t ₍₆₎	poziom p		współ.	t ₍₁₅₎	poziom p
w. wolny	0,1283	11,67277	0,000024	w. wolny	0,09204	1,63187	0,123519
$e^{S_{k\beta}(EA_{RMS})}$ ⁽³⁾	1,1667	4,74414	0,003178	$e^{S_{k\beta}(EA_{RMS})}$ ⁽³⁾	0,9548	1,87292	0,080701
$\left(e^{S_{k\beta}\left(EA_{RMS}\right)}_{(3)}\right)^{2}$	-3,69893	-3,79464	0,009024	$\left(e^{S_{k\beta}\left(EA_{RMS}\right)}_{(3)}\right)^{2}$	-1,59219	-1,59744	0,131016
R	·	R	R con:	R		R	R
((w)(1)· (EA_{m})	$(s_{u(w)(2)})$	$(s_{a(w)(3)}, s_{a(w)(3)})$	n_a	(w)(1). (EA_{mn})	$A_{a(W)(2)}$.	$\begin{pmatrix} R_{a(w)(3)} \\ c \left(S_{w}(EA_{w}) \right) \end{pmatrix}$
$f(e^{-\omega})$) f	$\left(e^{\frac{\pi}{2}}\right)$	$\int \left(e^{\frac{x_{\mu}}{3}} \right)$	$f(e^{i\phi})$	(1) f	(e ⁻¹)	$\int \int \left(e^{x_{\mu} - x_{\mu\nu}} \right)^{(3)}$
R 0,7520	30 0	,743342	0,93136	R 0,4840	27 0	,700105	0,469083
$R^2 = 0,5655$	49 0	1,552558 1403410	0,86743	$R^2 = 0,2342$	82 0	0,490146 0,422166	0,220039
$F_{(2,6)}$	72 3	,704773	19,62974	$F_{(2,15)} = 2.2947$	29 7	210103	2,115863
p 0,0820	01 0	,089580	0,00233	p 0,1350	57 0	,006395	0,155077
$\begin{array}{ll} F_{kr(2,6)} &= 5,14 \\ t_{kr(0,05;6)} &= 2,4469 \end{array}$				$ \begin{array}{l} F_{kr(2,15)} &= 3,68 \\ t_{kr(0,05;15)} &= 2,1199 \end{array} $			

Tab. 4.8.77. Zmiany średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości powierzchni próbek ($R_{a(w)}$) w funkcji nieliniowego modelu odnoszącego się do skośności rozkładu *beta* dla EA ($\hat{y}_{S_{k\beta}} = e^{S_{k\beta}(EA_{RMS})}$)

Powyższe aspekty warunkują niską użyteczność nieliniowego modelu powiązanego z centralnym momentem 4. rzędu sygnału emisji akustycznej $\hat{y}_{m_4} = e^{m_4(EA_{RMS})}$, w obszarze powiązania go z innymi czynnikami wyjściowymi procesu szlifowania. Dowodzi to braku moż-

liwości zastosowania omawianego modelu do wnioskowania o wartościach jakichkolwiek składowych parametrów zużycia ściernicy, a także dokonywania całościowej oceny zdolności skrawnej CPS.

T1-250x32x98-9 NC10 (60 \pm 2) HR f = 0.3 [mm/skol	T1-250x2 NC10 (6) f = 0.3	32x98-9 0±2) HR	9A60M7 C, $v_s = 27$	7-42 m/s, $7,5 \text{ [m/s]}, a_e = \frac{10^{-3} \text{ [m^3 min]}}{10^{-3} \text{ [m^3 min]}}$	0,03 [mm],					
	$[\mathbf{x}], \mathcal{Q}_c = \mathcal{I}$]	$v_{ft} = 24$	$\int a = 0, 3$ [m/min]	IIIII/ SKO	$[X_{c}], Q_{c} = J^{c}$]	
0.18					0.24					
0,15	0		□ powt. ○ powt. △ powt.	1 . 2 _ 3 _	0,20				 рои рои рои рои 	т. 1 т. 2 т. 3
0,12 <u> <u> </u> </u>	000			-	0,16 س س ^ت 12			• •		
0,06	28% °	8	°7		0,08					_
0,03	0,2	0,3 0,4 e ^{Skp(EARMS)}	0,5 0,6	0,7	0,04	0 0,05	• • • • • • • • • • • • • • • • • • •	15 0,20 0,25 e ^{Skp(EARMS)}	5 0,30 0,35	0,40
$l_{st(1)} = 0,07747+0,62$	$3334 \cdot e^{S_{k\beta}}$	(EA_{RMS}) -3,7322	$29 \cdot \left(e^{S_{k\beta} \left(EA_{RMS} \right)} \right)$	$\binom{1}{(1)}^{2}$	$l_{st(1)} = 0,13$	2222-0,4	4463 $e^{S_{k\beta}}$	$(EA_{RMS})_{(1)}$ +0,89	$2338 \cdot \left(e^{S_{k\beta}(EA)} \right)$	$\binom{1}{(1)}^{2}$
w. wolny	współ. 0.07747	t ₍₆₎ 2.66408	poziom p 0.037320		w. wolny		współ. 0.132222	t ₍₁₅₎ 5,43185	poziom p 0.000069	
$e^{S_{k\beta}(EA_{RMS})}$	0,63334	1,06197	0,329114		$e^{S_{k\beta}(EA_{R})}$	(1)	-0,44463	-1,55909	0,139821	
$\left(e^{S_{k\beta}\left(EA_{RMS}\right)}\right)^{2}$	-3,73229	-1,38770	0,214570		$\left(e^{S_{k\beta}\left(EA_{g}\right)}\right)$	(1) $\binom{1}{2}$	0,892338	1,30818	0,210506	
$l_{st(2)} = 0,135817-0,1$	5692 $e^{S_{k\beta}}$	$(EA_{RMS})_{(2)}$ -0,418	$897 \cdot \left(e^{S_{k\beta}(EA_{RM})}\right)$	$\binom{(2)}{(2)}^{2}$	$l_{st(2)} = 0,16$	5314-0,46	$5995 \cdot e^{S_{k\beta}(t)}$	$(2)^{(2)} + 0,601$	$908 \cdot \left(e^{S_{k\beta}(EA_{R})}\right)$	(2) $\binom{1}{2}^{2}$
	współ.	t ₍₆₎	poziom p				współ.	t ₍₁₅₎	poziom p	
w. wolny	0,135817	4,595899	0,003708		w. wolny	``````````````````````````````````````	0,16314	7,77024	0,000001	-
$e^{S_{k\beta}(EA_{RMS})}$ (2)	-0,15692	-0,164547	0,874704	_	$e^{S_{k\beta}(EA_{R})}$	(2)	-0,46995	-2,38876	0,030487	
$\left(e^{S_{k\beta}\left(EA_{RMS}\right)}\right)^{2}$	-0,41897	-0,071017	0,945692		$\left(e^{S_{k\beta}\left(EA_{R}\right)}\right)$	$\binom{(2)}{(2)}^{2}$	0,601908	1,80326	0,091469	
$l_{st(3)} = 0,110129-0,3$	$8068 \cdot e^{S_{k\beta}(t)}$	$(3)^{EA_{RMS}}$ +0,585	$76 \cdot \left(e^{S_{k\beta}(EA_{RMS})}\right)$	$\binom{)}{(3)}^{2}$	$l_{st(3)} = 0,17$	/806-0,63	$939 \cdot e^{S_{k\beta}(t)}$	$(3)^{EA_{RMS}}$ +1,061	$338 \cdot \left(e^{S_{k\beta}(EA_{R})}\right)$	$\binom{(3)}{(3)}^{2}$
	współ.	t ₍₆₎	poziom p				współ.	t ₍₁₅₎	poziom p	
w. wolny	0,110129	8,95032	0,000109		w. wolny		0,17806	5,52976	0,000058	
$e^{S_{k\beta}(EA_{RMS})}$ ⁽³⁾	-0,3068	-1,11509	0,307474		$e^{S_{k\beta}(EA_{R})}$	(3)	-0,63939	-2,19664	0,044178	
$\left(e^{S_{k\beta}\left(EA_{RMS}\right)}\right)^{2}$	0,58576	0,53710	0,610520		$\left(e^{S_{k\beta}\left(EA_{k}\right)}\right)$	$\binom{(3)}{(3)}^{2}$	1,061338	1,86511	0,081849]
	<i>w</i> D [•]	Luo:	Lua			1	<i>(</i> 1) [•]	Lan	Lua	
$f\left(e^{S_{i\beta}}\right)$	$\left(\frac{EA_{AUS}}{1} \right)$	$f\left(e^{\sum_{k=0}^{N(2)}\left(EA_{MS}\right)}\right)$	$\int \int e^{s_{is}(EA_{is})}$	(3)		$f\left(e^{s_{u}}\right)$	$\left(\frac{EA_{_{BUS}}}{1}\right)$	$f\left(e^{S_{i\beta}\left(EA_{RMS}\right)}\right)$	$\int f\left(e^{S_{\mu\nu}\left(EA\right)}\right)$	(3)
R 0,5821	45	0,399626	0,763938		R	0,3879	18	0,572087	0,530955	
R ² 0,3388	93	0,159701	0,583601		R ²	0,1504	81	0,327284	0,281913	
$R_{skor.}^2 = 0,1185$	24	-0,120398	0,444801		R ² skor.	0,0372	11	0,237588	0,186169	
$r_{(2,6)} = 1,53/8$	42 45	0,570159	4,204622		P(2,15)	1,3285	∠1 07	0.051137	2,944423	
$F_{kr(2,6)} = 5,14$ $t_{kr(0,05;6)} = 2,4469$			0,072199		$F_{kr(2,15)} = t_{kr(0,05;15)} =$	= 3,68 = 2,1199	•1	-,	0,000401	J

Tab. 4.8.78. Zmiany wartości starcia względnego wzniesień profilu (l_{st}) w funkcji nieliniowego modelu odnoszącego się do skośności rozkładu *beta* dla sygnału EA ($\hat{y}_{S_{k\beta}} = e^{S_{k\beta}(EA_{RMS})}$)

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności α = 0,05.



Tab. 4.8.79. Zmiany wartości długości czynnej krawędzi ściernicy (B_{kr}) w funkcji nieliniowego modelu odnoszącego się do skośności rozkładu *beta* dla sygnału EA ($\hat{y}_{S_{k\beta}} = e^{S_{k\beta}(EA_{RMS})}$)



Tab. 4.8.80. Zmiany wartości naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego (σ_{max}) w funkcji modelu odnoszącego się do skośności rozkładu *beta* dla sygnału EA ($\hat{y}_{S_{k\beta}} = e^{S_{k\beta}(EA_{RMS})}$)

Korzystne relacje, co wyrażone jest wyższymi wartościami współczynników korelacji i determinacji (R^2), odnotowano dla deskryptora $\hat{y}_{S_{k\beta}}$. Znajduje to szczególne odzwierciedlenie w przypadku próby powiązania sygnału EA z parametrem określającym długość czynnej krawędzi ściernicy (B_{kr}) oraz naprężeniami warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego (σ_{max}), a także geometrycznym wskaźnikiem zdolności skrawnej (K_{CPS}).

Jednakże, ze względu na brak powtarzalności wysokich wartości współczynników korelacji, otrzymane funkcje dopasowania ponownie należy uznać za statystycznie nieznaczące. Otrzymane wyniki korelacji i ich szczegółowa analiza, świadczą o braku możliwości zastosowania któregokolwiek z proponowanych modeli do wnioskowania o wartościach pozostałych parametrów zużycia ściernicy i wyników obróbki charakteryzujących powierzchnie obrabiane.

Analiza zmian powyżej zaprezentowanych modeli wskazała jednakże, na możliwość dalszych poszukiwań, przede wszystkim w obrębie dwóch modeli, opartych na parametrach $m_4(EA_{RMS})$ oraz $S_{k\beta}(EA_{RMS})$, które jako jedyne wykazy jednoznaczne, postępujące zmiany w funkcji zużycia CPS, a także dają możliwość oszacowania wartości granicznej, której prze-

kroczenie decydowałoby o uznaniu ściernicy, jako całkowicie zużytej i niezdatnej do dalszej pracy.

Ponieważ nieliniowy charakter obiektu badań może być bardziej złożony, zdecydowano się dodatkowo opisać go za pomocą funkcji ułamkowych:

$$\hat{\overline{Y}} = \frac{e^{\hat{\overline{\eta}}(x_i, b_j)}}{e^{\hat{\overline{\gamma}}_2(x_i, b_j)}} = E_{idx} \,. \tag{4.8.41}$$

W ten sposób sporządzono przebiegi funkcji oznaczonych ogólnym symbolem E_{idx} , gdzie *idx*, to indeks odnoszący się do danej kombinacji obiektów badań. Na rys. 4.8.50 (\Box 252) oraz 4.8.51 (\Box 253) zebrano wybrane wykresy reprezentujące trendy zmian danego parametru w badanym okresie trwałości ściernic. Wyniki dla pozostałych parametrów obróbki zamiesz-czono w załączniku (rozdz. Z.4.3.5).



Rys. 4.8.50. Zmiany średnich wartości parametrów energetycznych typu E_{idx} w funkcji czasu pracy ściernicy o nominalnej twardości J

Analizie poddano wszystkie możliwe kombinacje funkcji \hat{Y}_1 i \hat{Y}_2 , z których wybrano najkorzystniejsze (ze względu na kształtowanie się ich wartości) parametry E_{idx} , dzieląc je jednocześnie na 3 grupy tematyczne:

określające utratę zdolności skrawnej przez CPS:

$$E_{Sk\beta/RMS} = e^{S_{k\beta}(EA_{RMS})} / e^{EA_{RMS}} , \qquad (4.8.42)$$
$$E_{Sk\beta/s2} = e^{S_{k\beta}(EA_{RMS})} / e^{s^2(EA_{RMS})}, \qquad (4.8.43)$$

$$E_{Sk\beta/m4} = e^{S_{k\beta}(EA_{RMS})} / e^{m_4(EA_{RMS})}, \qquad (4.8.44)$$

- określające stopień zużycia ściernicy:

$$E_{RMS/Sk\beta} = e^{EA_{RMS}} / e^{S_{k\beta}(EA_{RMS})}, \qquad (4.8.45)$$

$$E_{s2/Sk\beta} = e^{s^2(EA_{RMS})} / e^{S_{k\beta}(EA_{RMS})}, \qquad (4.8.46)$$

$$E_{m4/Sk\beta} = e^{m_4(EA_{RMS})} / e^{S_{k\beta}(EA_{RMS})}, \qquad (4.8.47)$$

 oraz wykazujące możliwość bliskiej relacji z wskaźnikiem K_{CPS}, czyli te które najprawdopodobniej reprezentują lokalne momenty odnowienia CPS:

$$E_{s2/RMS} = e^{s^2(EA_{RMS})} / e^{EA_{RMS}}, \qquad (4.8.48)$$

$$E_{RMS/K} = e^{LA_{RMS}} / e^{K(LA_{RMS})}, \qquad (4.8.49)$$

$$E_{s2/K} = e^{s^{*}(EA_{RMS})} / e^{K(EA_{RMS})} , \qquad (4.8.50)$$

$$E_{m4/K} = e^{m_4(EA_{RMS})} / e^{K(EA_{RMS})} .$$
(4.8.51)

T1-250x32x98-99A60M7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5$ [m/s], $a_e = 0,03$ [mm], $f_a = 0,3$ [mm/skok], $Q_c = 3 \times 10^{-3}$ [m³min⁻¹]



Rys. 4.8.51. Zmiany średnich wartości parametrów energetycznych typu E_{idx} w funkcji czasu pracy ściernicy o nominalnej twardości M

Ponadto, w związku z bardzo wysokim podobieństwem przebiegu niektórych deskryptorów tworzących grupy bliźniacze, zdecydowano się wyselekcjonować te parametry, które wymagałyby najmniejszej ilości obliczeń. Ostatecznie, zdecydowano się przeprowadzić dalszą analizę ograniczoną do 3 modeli:

- $E_{Sk\beta/RMS}$,
- $E_{RMS/Sk\beta}, E_{s2/RMS},$
- oraz $E_{RMS/K}$,

wyznaczając ich ogólny charakter zmian oraz korelacje, a dla pierwszych dwóch dodatkowo przypuszczalną wartość graniczną, której przekroczenie będzie decydowało o konieczności przerwania procesu obróbki.

Poniżej zaprezentowano odnotowane zmiany wartości wybranych wskaźników E_{idx} w funkcji czasu pracy ściernic (rys. 4.8.52 – 4.8.55, $\Box 254 - 257$).



Rys. 4.8.52. Zmiany wartości parametru typu $E_{RMS/K}$ w funkcji czasu pracy ściernic

(verte •)

Analiza kształtu krzywej wyznaczonej w całym rozpatrywanym okresie czasu pracy ściernicy wykazała, że parametr, który stanowi nieliniowy model odnoszący się jednocześnie do wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej (EA_{RMS}) oraz koncentracji rozkładu tego sygnału ($K(EA_{RMS})$), może stanowić efektywne narzędzie służące do oceny stopnia zużycia ściernic. Wynika to z faktu, że deskryptor $E_{RMS/K}$ posiada silną tendencję do zwiększania swojej wartości (analogicznie do zmian współczynnika koncentracji dla rozkładu *beta* $K_{\beta}(EA_{RMS})$) wraz z przedłużającym się okresem czasu pracy ściernicy, który powiązany jest ściśle z tępieniem się jej czynnej powierzchni. Posiada on najmniejszą wartość na początku pracy ściernicy (zaraz po jej naostrzeniu w procesie tzw. obciągania), a największą na końcu okresu trwałości narzędzia, wyznaczając tym samym moment, w którym CPS nie nadaje się do dalszej eksploatacji.





Porównując wpływ wydajności objętościowej szlifowania Q_w (regulowany poprzez zmienną wartość posuwu stycznego stołu v_{fl}), można jednoznacznie stwierdzić, że średnia wartość oraz tempo wzrostu deskryptora $E_{RMS/K}$ z pewnością zależały od parametrów obróbki. Im większa wydajność Q_w , tym przebiegi charakteryzowały się większym kątem nachylenia.

Oznacza to, że zwiększanie wydajności objętościowej szlifowania korzystnie wpływało na czułość tego parametru, rozumianej, jako rozpiętość jego wartości. Ponadto stwierdzono, że wyższe wartości posuwu stycznego stołu szlifierki powodowały ogólne podniesienie rejestrowanych wartości parametru $E_{RMS/K}$.



Rys. 4.8.53. Zmiany wartości parametru typu $E_{s2/RMS}$ w funkcji czasu pracy ściernic

(verte ♦)

Rys. 4.8.53. (ciąg dalszy)



W przypadku analizy parametru $E_{s2/RMS}$ odnotowano zbyt silne, lokalne zmiany by jednoznacznie określić ich trend w skali całego zarejestrowanego przedziału czasowego, a tym samym wnioskować o zmianach zdolności skrawnej CPS – rys. 4.8.53 (D255).



Rys. 4.8.54. Zmiany wartości parametru typu $E_{RMS/Sk\beta}$ w funkcji czasu pracy ściernic

(verte •)





Natomiast w przypadku deskryptora $E_{RMS/Sk\beta}$ (rys. 4.8.54, D256) odnotowano podobny charakter zmian w domenie czasowej, jak w przypadku parametru $E_{RMS/K}$. Stopniowo rosnące wartości w funkcji zużycia/starcia narzędzia, a szczególnie ich gwałtowny wzrost w końcowej fazie, sugerują, że parametr $E_{RMS/Sk\beta}$ może z powodzeniem być wykorzystany do oceny okresu trwałości ściernic, szczególnie poprzez wyznaczenie wartości granicznych, odpowiednich dla konkretnych warunków obróbki.



Rys. 4.8.55. Zmiany wartości parametru typu $E_{Sk\beta/RMS}$ w funkcji czasu pracy ściernic

(verte *)

Rys. 4.8.55. (ciąg dalszy)



Bardzo korzystne cechy, które z łatwością można wykorzystać podczas dokonywania oceny utraty zdolności skrawnej ściernic, wykazał parametr $E_{Sk\beta/RMS}$ (rys. 4.8.55, \Box 257). Wszystkie jego cechy są cechami pożądanymi. W funkcji czasu pracy ściernicy, czyli postępującego jej starcia, odnotowano wyraźny spadek wartości opisanego parametru, zbliżony kształtem do zmian jakie zaobserwowano dla wskaźnika zdolności skrawnej K_{CPS} .

Spadek wartości jest szczególnie silny (względnie większy kąt pochylenia krzywej) na początku okresu trwałości, gdy ściernica jest ostra ściernica i w kontakcie z powierzchnią obrabianą traci osłabione zabiegiem obciągania ziarna ścierne. Ponadto, parametr $E_{Sk\beta/RMS}$ przyjmował w trakcie badań eksperymentalnych najniższe wartości w momencie przerwania procesu szlifowania, co zdeterminowane było poprzez wystąpienie przypaleń szlifierskich. Powyższe aspekty świadczą o wysokim potencjale, jaki tkwi w omawianym modelu.

Wartości graniczne opracowanych współczynników sygnału EA

Analizując wartości opracowanych deskryptorów sygnału EA, dla konkretnych ściernic i przyjętych warunków pracy, można z powodzeniem dla wybranych parametrów wyznaczyć maksimum, po osiągnięciu którego ściernicę można uznać za zużytą i należy ją wymienić lub odnowić jej czynną powierzchnię.

Poniżej zaprezentowano przykładowe wartości graniczne parametrów związanych z różnymi cechami statystycznymi sygnału EA dla różnych warunków szlifowania.

Aby określić wartości graniczne współczynników energetycznych emisji akustycznej typu $E_{RMS/Sk\beta}$ oraz $E_{Sk\beta/RMS}$, dla każdej ściernicy i prędkości posuwu wybrano punkty o naj-

wyższych wartościach. W przypadku, gdy najwyższy punkt nie był jednocześnie ostatnim punktem pomiarowym, uwzględniono także najwyższą wartość go poprzedzającą. Dla wybranych wartości obliczono rozproszenie w postaci odchylenia standardowego.



Tab. 4.8.81. Wpływ prędkości posuwu stycznego stołu szlifierki (v_{ft}) na rozproszenie wartości współczynnika energetycznego emisji akustycznej typu $E_{RMS/Sk\beta}$

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Z kolei dla obliczonych wartości odchylenia standardowego wyznaczono równanie regresji w postaci wielomianu kwadratowego. Wyniki zamieszczono w tablicach 4.8.81 (D259) oraz 4.8.84 (D261). W celu dokładnego określenia maksymalnych wartości współczynników energetycznych, osiągnięcie których oznaczałoby zakończenie właściwych własności eksploatacyjnych ściernic, przeprowadzono kolejne analizy statystyczne.

W tym celu utworzono najlepiej dopasowany do danych eksperymentalnych model regresji w postaci funkcji wykładniczej: $y = a \cdot e^{(b \cdot x)}$ lub w postaci funkcji wielomianowej drugiego stopnia: $y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$ (w zależności od układu danych dla konkretnego przypad-ku).



Tab. 4.8.82. Wpływ prędkości posuwu stycznego stołu szlifierki (v_{fl}) na maksymalne rejestrowane wartości współczynnika energetycznego emisji akustycznej typu $E_{RMS/Sk\beta}$

Porównując wartości współczynników korelacji otrzymanych dla wyznaczonych równań (tab. 4.8.82, \Box 260 oraz tab. 4.8.85, \Box 262), można wywnioskować, że zmienność zmiennej zależnej ($E_{RMS/Sk\beta}$ lub $E_{Sk\beta/RMS}$) może być objaśniona przez zmienne niezależne włączone do modelu, czyli v_{fl} . Ponadto, obliczone wartości statystyki *t-Studenta* znacznie przekraczają wartości krytyczne, a wartości *poziomu-p* są znacznie mniejsze od przyjętej wartości

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

poziomu istotności α . Powyższe aspekty analizy statystycznej świadczą, że w analizowanych przypadkach nie było przesłanek do odrzucenia hipotezy o istotności wyznaczonych zależności.

	wartość graniczna: max(E)					
ściernica i warunki pracy	[m/min]	wynikająca z aproksymacji	odchylenie standardowe	po uwzględnieniu odch. stand.		
T1-250x32x98-99A60J7V-42m/s,	4	61,861116	6,030589	55,830527		
NC10 (60 \pm 2) HRC, $v_{e} = 27.5 \text{ [m/s]}, a_{e} = 0.03 \text{ [mm]}.$	14	116,721623	28,570189	88,1514339		
$f_a = 0.3 \text{ [mm/skok]}, Q_c = 3 \times 10^{-3} \text{ [m^3min^{-1}]}$	24	220,234262	58,298989	(<i>E_{RMS/Skp}</i>) po uwzględnieniu odch. stand. 55,830527 88,1514339 161,935273 16,6039554 94,5413238 118,596944		
T1-250x32x98-99A60M7V-42m/s,	4	88,3203554	71,7164	16,6039554		
NC10 (60 \pm 2) HRC, v _z = 27.5 [m/s] a_z = 0.03 [mm]	14	109,581724	15,0404	94,5413238		
$f_a = 0.3 \text{ [mm/skok]}, Q_c = 3 \times 10^{-3} \text{ [m^3min^{-1}]}$	24	135,961344	17,3644	118,596944		

Tab. 4.8.83. Przykładowe wartości graniczne $E_{RMS/Sk\beta}$ do wyznaczenia utraty zdolności skrawnej

Łącząc oba równania regresji, które opisują wartości maksymalne oraz ich odchylenie standardowego, otrzymano niezależne od warunków obróbki, głównie dla dowolnego parametru prędkości posuwu stycznego stołu szlifierki (v_{ft}), formuły, które pozwalają wyznaczyć wartości graniczne parametrów $E_{RMS/Sk\beta}$ oraz $E_{Sk\beta/RMS}$ (tab. 4.8.82, D260 oraz tab. 4.8.85, D262). Przykładowe wartości graniczne dla rozpatrywanych parametrów, obliczone z wykorzystaniem opracowanych funkcji, umieszczono w tabelach 4.8.83 (D261) oraz 4.8.86 (D263).

Z przebiegu wykresów dla ściernicy o nominalnie mniejszej twardości (99A60J7V) wynika, że punkty odzwierciedlające dane zaobserwowane w trakcie badań rozkładają się losowo wokół wyestymowanej zależności, co świadczy o jej adekwatności. Jednakże punkty o numerach #13 i #10 (dla parametru $E_{RMS/Sk\beta}$) odstają od linii regresji, co oznacza, że są to wartości obarczone błędem grubym. Nie potwierdzają tego wniosku wyniki otrzymane dla parametru $E_{Sk\beta/RMS}$, ponieważ w tym przypadku odnotowano niezgodność dla punktu z numerem #11.



Tab. 4.8.84. Wpływ prędkości posuwu stycznego stołu szlifierki (v_{ft}) na rozproszenie wartości współczynnika energetycznego emisji akustycznej typu $E_{Sk\beta/RMS}$

 $(verte \bullet)$

Tab. 4.8.84. (*ciąg dalszy*)

T1-250x32x9 NC10 (60 \pm 2) $f_a = 0.3$ [mm/s	8-99A60J7V-42m/ HRC, $v_s = 27,5$ [m skok], $O_c = 3 \times 10^{-3}$	[s, /s], $a_e = 0.03$ [mm], [m ³ min ⁻¹]	T1-250x32x98-99A60M7V-42m/s, NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5$ [m/s], $a_e = 0,03$ [mm], $f = 0.3$ [mm/skok] $Q = 3 \times 10^{-3}$ [m ³ min ⁻¹]				
Wartości średni dla punktów, dl du na pojawien v_{fi} [m/min] 4 14 24 $s\left(E_{sk\beta/RMS}\right) =$ w. wolny v_{fi} $(v_{fi})^2$	e oraz odchylenia sta a których przerwano ie się przypaleń: $\overline{E}_{Sk\beta/RMS}$ 0,014910767 0,008138964 0,0047197 = -0,000651+0,00060 współ. t ₍ -0,000651 - 0,000605 6 -0,000022 -	andardowego współczynnik proces szlifowania ze wzgl $\pm s \left(E_{sk\beta/RMS} \right)$ 0,001418996 0,003455543 0,000978864 05·v/r-0,000022·(v/r) ² 1) poziom p 10,8620 0,058445 1,2580 0,010392 56,6223 0,009555	1 2-	Wartości średni dla punktów, dl względu na poja v_{ft} [m/min] 4 14 24 $s\left(E_{sk\beta/RMS}\right) =$ w. wolny v_{ft} $\left(v_{ft}\right)^2$	e oraz odchylenia s a których przerwan awienie się przypale $\overline{E}_{sk\beta/RMS}$ 0,012867334 0,010207198 0,007254227 = 0,009539-0,00082 współ. 0,009539 -0,000828 0,000020	tandardowege o proces szlife eń: $\pm s \left(E_{sk\beta} \right)$ 0,0065451 0,0017974 0,0009332 28· v_{ft} +0,00002 t ₍₁₎ 171,6709 -90,3801 62,8162	$\begin{array}{c} 0 \text{ współczynnika} \\ 0 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 $
$\begin{tabular}{ c c c c c c c } \hline & & & & & & \\ \hline & & & & & & & \\ \hline & & & &$	$ \left(E_{Sk\beta/RMS}\right): f(v_{\beta}) $ $ 999895 $ $ 999790 $ $ 999369 $ $ 75,653 $ $ 015 $ $ 062 $		$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	$\left(E_{sk\beta/RMS}\right):f(v_{\beta})$ $\frac{999977}{999955}$ $\frac{9999865}{9081,36}$ $\frac{006717}{90062}$			

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Natomiast w przypadku ściernicy o nominalnie większej twardości (99A60M7V), punkty odzwierciedlające wszystkie dane zaobserwowane w trakcie badań rozkładają się wokół zależności za wyjątkiem punktu z numerem #2, niezależnie od rozpatrywanego parametru typu E_{idx} . Oznacza to, że jest to wartość obarczona błędem grubym.

Tab. 4.8.85. Wpływ prędkości posuwu stycznego stołu szlifierki (v_{fl}) na maksymalne rejestrowane wartości współczynnika energetycznego emisji akustycznej typu $E_{Sk\beta/RMS}$



 $(verte \bullet)$

Tab. 4.8.85. (ciąg dalszy)



Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności a = 0,05.

Tym samym, w badaniach potwierdzono, że analiza współczynników energetycznych typu E_{idx} , może z powodzeniem posłużyć do identyfikacji postępującego zużycia ściernicy poprzez analizę ich wartości. Po osiągnięciu wartości granicznych można z wysokim prawdopodobieństwem uznać ściernicę za stępioną i przerwać proces szlifowania.

	wartość graniczna: min(
ściernica i warunki pracy	[m/min]	wynikająca z aproksymacji	odchylenie standardowe	po uwzględnieniu odch. stand.		
T1-250x32x98-99A60J7V-42m/s,	4	0,0149122	0,001417	0,0163292		
NC10 (60 \pm 2) HRC, $v_s = 27.5 \text{ [m/s]}, a_s = 0.03 \text{ [mm]}.$	14	0,0081482	0,003507	0,0116552		
$f_a = 0.3 \text{ [mm/skok]}, Q_c = 3 \times 10^{-3} \text{ [m^3min^{-1}]}$	24	0,0047242	0,001197	0,0059212		
T1-250x32x98-99A60M7V-42m/s,	4	0,012962	0,006547	0,019509		
NC10 (60 \pm 2) HRC, $v_{a} = 27.5$ [m/s], $a_{a} = 0.03$ [mm].	14	0,010132	0,001867	0,011999		
$f_a = 0.3 \text{ [mm/skok]}, Q_c = 3 \times 10^{-3} \text{ [m^3min^{-1}]}$	24	0,007302	0,001187	0,008489		

Tab. 4.8.86. Przykładowe wartości graniczne $E_{Sk\beta/RMS}$ do wyznaczenia utraty zdolności skrawnej

Korelacje opracowanych deskryptorów sygnału EA z geometrycznym wskaźnikiem zdolności skrawnej CPS

Ponieważ w części opisywanych w niniejszym rozdziale parametrów typu E_{idx} , zauważono charakterystyczne zmiany w momencie utraty zdolności skrawnej (określonej przez pojawienie się przypaleń szlifierskich), analizę sygnałów emisji akustycznej uwzględniającą parametry $E_{RMS/K}$, $E_{RMS/Sk\beta}$, $E_{s2/RMS}$ oraz $E_{Sk\beta/RMS}$, rozszerzono o określenie korelacji tych wielkości ze wskaźnikiem zdolności skrawnej ściernic (K_{CPS}).

Zgromadzone wykresy (tab. 4.8.87 - 4.8.90, $\Box 264 - 268$) reprezentujące w formie graficznej otrzymane relacje oraz ich szczegółowy opis statystyczny, pozwoliły na dogłębniejsze zidentyfikowanie przydatności poszczególnych parametrów do oceny okresu trwałości ściernic. Duże nagromadzenie zarówno wysokich, jak i niskich wartości parametru $E_{RMS/K}$ w wąskim paśmie najniższych wartości wskaźnika K_{CPS} spowodowało, że parametr ten nie charakteryzuje się wysokim współczynnikiem korelacji. Ponadto, analizując rozkład punktów zauważyć można, że najwięcej punktów gromadzi się w obszarze niskich wartości obu zmiennych. Oznacza to, że zmienna niezależna posiadała zbyt wąskie pasmo rozproszenia wartości, by uzyskać lepsze dopasowanie ze zmienną K_{CPS} .

Analizując zależność występującą pomiędzy zmianami wartości geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej ściernicy (K_{CPS}) a parametrem $E_{RMS/Sk\beta}$, ponownie otrzymano zbyt silne nagromadzenie punktów w jednym obszarze, by udało się określić funkcję dopasowania o wysokich (i powtarzalnych) wartościach współczynnika determinacji (R^2).



Tab. 4.8.87. Zmiany wartości geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej ściernicy (K_{CPS}) w funkcji parametru typu $E_{RMS/K}$

W przypadku zmian wartości geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej ściernicy (K_{CPS}) w funkcji parametru $E_{s2/RMS}$, odnotowano silną tendencję do kształtowania się zależności pomiędzy zmiennymi. Szczególnie w przypadku niższych wartości prędkości posuwu stycznego stołu szlifierki (v_{f}), zauważyć można istnienie prawidłowości.

Obie zmienne są proporcjonalne względem siebie. Wzrost lub spadek jednej z nich, odzwierciedla się w podobnej reakcji w drugiej zmiennej. Jednakże, relacja ta ponownie nie odzwierciedliła się w wynikach statystycznych, czego dowodem są niskie wartości współczynników korelacji i determinacji w większości powtórzeń.

T1-250x32x98-9		T1-250x32x98-99A60M7V-42m/s,							
NC10 (60 \pm 2) HR	0,03 [mm],	NC10 (60 \pm 2) HF	$\frac{1-250x32x98-99A60M7V-42m/s,}{1C10 (60\pm 2) HRC, v_s = 27,5 [m/s], a_e = 0,03 [mm],}{a_i = 0,3 [mm/skok], Q_c = 3 \times 10^{-3} [m^3min^{-1}]}$ $\frac{1}{1}$ 1						
$J_a = 0,3$ [IIIII/SK0.]	$J_a = 0,3$ [IIIII/SKO	$[K], Q_c = J^{\wedge}$]				
				$v_{ft} = 14$	[m/min]				
$K_{CPS(l)} = 0,026602$ -	$0,23291 \cdot E_{_{RN}}$	MS/K(1) +0,588	$78 \cdot \left(E_{RMS/K(1)}\right)$	$\left(\right)^{2}$	$K_{CPS(I)} = 0,027204$ -	0,23861 $\cdot E_{R}$	MS/K(1) +0,615	$647 \cdot \left(E_{_{RMS/K(1)}}\right)$	$\Big)^2$
w. wolny	współ. 0,026602	t ₍₁₁₎ 5,32364	poziom p 0,000243		w. wolny	współ. 0,027204	t ₍₁₃₎ 6,32332	poziom p 0,000026	
$E_{\rm RMS/K(1)}$	-0,23291	-1,96045	0,075756		$E_{_{RMS/K(1)}}$	-0,23861	-2,29570	0,038969	
$\left(E_{RMS/K(1)}\right)^2$	0,58878	1,42934	0,180686		$\left(E_{RMS/K(1)}\right)^2$	0,615647	1,80543	0,094208	
$K_{CPS(2)} = 0,03369-0$,27878 $\cdot E_{_{RMS}}$	$_{K(2)}$ +0,5969	$18 \cdot (E_{RMS/K})$	2) ²	$K_{CPS(2)} = 0,029150$ -	$0,23237 \cdot E_{R}$	MS/K(2) +0,487	$2561 \cdot (E_{RMS/K(2)})$	$\Big)^2$
	współ.	t ₍₁₁₎	poziom p			współ.	t ₍₁₃₎	poziom p	
w. wolny	0,03369	5,18776	0,000300		w. wolny	0,029150	13,17026	6,79E-09	
$E_{\rm RMS/K(2)}$	-0,27878	-2,47288	0,030963		$E_{RMS/K(2)}$	-0,23237	-5,35463	0,000131	
$\left(E_{_{RMS/K(2)}}\right)^2$	$\left(E_{_{RMS/K(2)}}\right)^2$ 0,596918 1,66456 0,124195			$\left(E_{_{RMS/K(2)}}\right)^2$	0,487561	3,75399	0,002409		
$K_{CPS(3)} = 0,027976-$	$0,23744 \cdot E_{_{RN}}$	MS/K(3) +0,515	$295 \cdot \left(E_{RMS/K}\right)$	$(3)^{2}$	$K_{CPS(3)} = 0,033789$	$0,31203 \cdot E_{R}$	MS/K(3) +0,803	$694 \cdot \left(E_{RMS/K(3)}\right)$	$\Big)^2$
	współ.	t ₍₁₁₎	poziom p			współ.	t ₍₁₃₎	poziom p	
w. wolny	0,027976	5,19901	0,000295		w. wolny	0,033789	4,97417	0,000254	
$E_{\rm RMS/K(3)}$	-0,23744	-2,50895	0,029041		$E_{\rm RMS/K(3)}$	-0,31203	-2,01218	0,065397	
$\left(E_{_{RMS/K(3)}}\right)^2$	0,515295	1,84625	0,091915		$\left(E_{_{RMS/K(3)}}\right)^2$	0,803694	1,39816	0,185465	
V	$f(E_{\perp})$	$V = \{ f(F) \}$	<i>V</i>	(F_{\perp})	<i>V</i>	$f(E_{\perp})$	$V \dots f(F_{-1})$	V	
R 0.6199	32	1.703036	0.675250	(Lidx)	$\frac{K_{CPS(l)}}{R}$	$\frac{1}{49}$	$\mathbb{R}_{CPS(2)}$, $\int (\mathcal{L}_{idx})$ 89316	$\frac{K_{CPS(3)}}{0.602162}$	idx)
R ² 0,3843	15 0	,494260	0,455963		R ² 0,3699	67 (),79773	0,362599	
R ² skor. 0,272373 0,402308 0,357047				$R^{2}_{skor.}$ 0,2730	39 (),76661	0,264537		
F _(2,11) 3,433145 5,375158 4,609609			F _(2,13) 3,8169	18 2	25,63558	3,697663			
p 0,069418 0,023529 0,035152					p 0,0496	43 (,00003	0,053541	
$\begin{array}{l} F_{kr(2,11)} &= 3,98 \\ t_{kr(0,05;11)} &= 2,2010 \end{array}$	$F_{kr(2,11)} = 3,98$ $t_{kr(0,05;11)} = 2,2010$								

Tab. 4.8.87. (*ciąg dalszy*)

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

Wyjątek stanowią wyniki otrzymane dla najmniejszej z analizowanych prędkości posuwu ($v_{ft} = 4 \text{ m/min}$) – załącznik, rozdz. Z.4.3.6. W tych warunkach, gdzie ściernica posiadała względnie długi okres kontaktu ziaren ściernych z powierzchnią obrabianą, proporcja odchylenia standardowego wartości skutecznej emisji akustycznej do swojego sygnału EA_{RMS} była na tyle istotna, że bardzo dokładnie odzwierciedliła zmiany makro- i mikrogeometryczne zachodzące na CPS. W efekcie opisywany parametr odtwarzał zmiany wskaźnika K_{CPS} . W tych warunkach, może on zastąpić pomiary geometryczne i z dużym prawdopodobieństwem dokładnie wyznaczyć chwilowe zdolności skrawne ściernicy.

Najkorzystniejsze wyniki, które świadczą o względnie wysokim stopniu korelacji otrzymano w przypadku zestawienia zmian wartości geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej ściernicy (K_{CPS}) w funkcji parametru $E_{Sk\beta/RMS}$. W tym przypadku odnotowano niemal prostoliniową tendencję do kształtowania się zależności pomiędzy zmiennymi. Obie zmienne są proporcjonalne względem siebie. Wzrost lub spadek jednej z nich, odzwierciedla się w podobnej reakcji w drugiej zmiennej. Jednakże, po raz kolejny odnotowano powtórzenia o niskich wartościach współczynników korelacji, a szczególnym przypadkiem okazała się analiza najniższej wartości prędkości posuwu stycznego stołu szlifierki ($v_{fl} = 4$ m/min) – za-łącznik, rozdz. Z.4.3.6.

T1-250x32x98-99	9A60J7V-4	2m/s,		T1-250x32x98-99A60M7V-42m/s,			
NC10 (60±2) HR	C, $v_s = 27,5$	$5 \text{ [m/s]}, a_e =$	0,03 [mm],	NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5$ [m/s], $a_e = 0,03$ [mm],			
$f_a = 0,3 [\text{mm/skol}]$	$[Q_c = 3 \times 1]$	10^{-3} [m ³ min ⁻¹]	']	$f_a = 0,3 \text{ [mm/skol}$	k], $Q_c = 3 \times$	10 ⁻³ [m ³ min ⁻¹]
			$v_{ft} = 14$	[m/min]			
0,06				0,06			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
0.05			powt. 1	· ·	A		powt. 1
0,00			o powt. 2	0,05			— • powt. 2
0,04			△ powt. 3				▲ powt. 3 .
0,03				0,04	▲		
\$ 0.02 A				8 0.02	,		
×° 0,02	,		-	×° 0,03	•		
0,01				0.02			
0,00							
-0.01				0,01			
0,01				-	●	· ·	····
-0,02	100 150 2	200 650	700 750 800	0	20 40	60 80) 100 120
		E _{RMS/Ska}				E _{RMS/Skb}	100 120
		, and only	()2			,	() ²
$K_{CPS(l)} = 0,046-0,00$	$198 \cdot E_{RMS/Sk}$	$_{\beta(1)}$ +0,00001	$8 \cdot \left(E_{RMS/SkB(1)} \right)^2$	$K_{CPS(l)} = 0,0291-0,0$	$00054 \cdot E_{RMS}$	$(Sk\beta(1)) + 0,00000$	$3 \cdot \left(E_{RMS/SkB(1)}\right)^2$
	wsnół	tan	poziom p		wsnół	t(12)	poziom p
w. wolny	0,046	6,46511	0,000046	w. wolny	0,0291	3,49651	0,003940
$E_{RMS/Sk\beta(1)}$	-0,00198	-4,10964	0,001731	$E_{RMS/Sk\beta(1)}$	-0,00054	-1,16191	0,266161
$\left(E_{RMS/SkB(1)}\right)^2$	0,000018	3,70767	0,003455	$\left(E_{RMS/SkB(1)}\right)^2$	0,000003	0,86350	0,403512
			()2				\
$K_{CPS(2)} = 0,035-0,00$	$13 \cdot E_{\text{BMS}/\text{She}}$	+0,00001	$\left(E_{r_{1}}, c_{r_{2}}\right)^{2}$	$K_{CPS(2)} = 0,0305-0,0$	$0007 \cdot E_{_{RMS/S}}$	+0,000005	$5 \cdot \left(E_{RMS/SkB(2)}\right)^2$
	KW373KP	(2)	$(EA_{RMS}/S_{k\beta}(2))$		wsnół	tup	noziom n
w wolny	wspoł.	t ₍₁₁₎	0.000251	w. wolny	0.0305	4.24513	0.000956
w. wonry	0,035	5,50547	0,000231	E	0.0007	1.5(702	0.140011
$E_{RMS/Sk\beta(2)}$	-0,0013	-2,90767	0,014248	$L_{RMS/Sk\beta(2)}$	-0,0007	-1,56792	0,140911
$\left(E_{_{RMS/Sk\beta(2)}}\right)^2$	0,00001	2,52580	0,028183	$\left(E_{RMS/Sk\beta(2)}\right)^2$	0,000005	1,21466	0,246098
	-		$\left(\Gamma \right)^{2}$	$K_{appa,a} = 0.021 - 0.00$	$0005 \cdot F$	-0 00000	$1 \cdot (E)^2$
$K_{CPS(3)} = 0,019-0,00$	$014 \cdot E_{RMS/Sk}$	$_{\beta(3)}$ +1,74E-0'	$7 \cdot \left(E_{RMS/Sk\beta(3)} \right)$	<i>K_{CPS(3)}</i> 0,021-0,00	RMS	/ <i>Sk</i> β(3) -0,00000	$(L_{RMS/Sk\beta(3)})$
	współ.	t ₍₁₁₎	poziom p	,	współ.	t ₍₁₃₎	poziom p
w. wolny	0,019	5,81340	0,000117	w. wolny	0,021	1,694917	0,113896
$E_{_{RMS/Sk\beta(3)}}$	-0,00014	-2,20756	0,049429	$E_{RMS/Sk\beta(3)}$	-0,000005	-0,007806	0,993891
$\left(E_{RMS/SkB(3)}\right)^2$	1,74E-07	1,96519	0,075146	$\left(E_{RMS/Sk\beta(3)}\right)^2$	-0,000001	-0,245051	0,810243
	I	1					
KCPS(I)	$f(E_{idx})$	$K_{CPS(2)}$: $f(E_{idr})$	$K_{CPS(3)}$: $f(E_{idx})$	K _{CPS(1)}	$f(E_{idx})$	$K_{CPS(2)}$: $f(E_{idx})$	$K_{CPS(3)}$: $f(E_{idx})$
R 0,8057	9 0	,713402	0,589905	R 0,4532	90 (0,627538	0,279112
R ² 0,6493	0 0	,508943	0,347988	$R^2 = 0.02054$	12	0,393804	0,077903
$R^2_{skor.}$ 0,5855	3 0	,419660	0,229440	Easter 1,6800	55	4 222610	0.549153
F _(2,11) 10,182	85 5	,700321	2,935426	p = 0.2242	39	0.038635	0.590264
p 0,00314	4 0	,020009	0,095149	P 0,2242	[`	-,	0,00000
F 3.08				$F_{kr(2,13)} = 3,81$			
$t_{kr(2,11)} = 3,90$ $t_{kr(0,05;11)} = 2,2010$				$t_{kr(0,05;13)} = 2,1604$			
•KF(0,05;11) 2,2010							

Tab. 4.8.88. Zmiany wartości geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej ściernicy (K_{CPS}) w funkcji parametru typu $E_{RMS/Sk\beta}$

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

T1-250x32x98-9 NC10 (60 \pm 2) HF f_{-} = 0.3 [mm/sko	9A60J7V-4 RC, $v_s = 27,5$ k] $Q_s = 3 \times 1$	2m/s, 5 [m/s], $a_e =$	0,03 [mm],	T1-250x32x98-9 NC10 (60 \pm 2) HF $f_{} = 0.3$ [mm/sko	9A60M7V- RC, $v_s = 27,3$ k] $Q_s = 3 \times 3$	42 m/s, 5 [m/s], $a_e = 10^{-3} \text{ [m^3 min^3]}$	0,03 [mm], 1	
	$[x_j, g_c]$]	$v_{ft} = 14$	[m/min]	$\mathbf{x}_{j}, \mathbf{y}_{c} = \mathbf{y}_{c}$		1
$\begin{array}{c} 0,06 \\ \hline & & p \\ 0,05 \\ \hline & & p \\ 0,04 \\ \hline & & 0,03 \\ 0,02 \\ 0,01 \\ \hline & & 0,02 \\ 0,01 \\ \hline & & 0 \\ 0,25 \\ 0,01 \\ \hline & & 0 \\ 0,25 \\ 0,01 \\ \hline \\ & 0 \\ 0,25 \\ 0,01 \\ \hline \\ & 0 \\ 0,25 \\ 0,01 \\ \hline \\ & 0 \\ 0,25 \\ 0,01 \\ \hline \\ & 0 \\ 0,25 \\ 0,01 \\ \hline \\ & 0 \\ 0,25 \\ 0,01 \\ \hline \\ & 0 \\ 0,25 \\ 0,01 \\ \hline \\ & 0 \\ 0,25 \\ 0,01 \\ \hline \\ & 0 \\ 0,25 \\ 0,01 \\ \hline \\ & 0 \\ 0,25 \\ 0,01 \\ \hline \\ & 0 \\ \hline \\ & 0 \\ 0,01 \\ \hline \\ & 0 \\ \hline \\ & 0 \\ 0,01 \\ \hline \\ & 0 \\ \hline \\ \\ & 0 \\ \hline \\ \\ & 0 \\ \hline \\ \\ \hline \\ & 0 \\ \hline \\ \hline \\ \\ \hline \\ \hline \\ \\ \hline \\ \\ \hline \\ \hline \\ \hline$	D,40 0,4	5 0,50	0,06 0,05 0,04 0,04 0,02 0,01 0,26 0,28	powt. 1 powt. 2 powt. 3 0,30 0,32 0,	34 0,36 0,38 E _{s2RMS}			
$K_{CPS(l)} = 0,092018$ -	0,5202 $\cdot E_{s2/2}$	_{RMS(1)} +0,8235	$1 \cdot (E_{s2/RMS(1)})$	$\right)^{2}$	$K_{CPS(1)} = 0,38532-2$	2,19026 $\cdot E_{_{s2/}}$	_{RMS(1)} +3,1677	$T \cdot \left(E_{s2/RMS(1)}\right)^2$
w wolny	współ. 0.092018	t ₍₁₁₎ 1 80292	poziom p 0 098833	-	w wolny	współ. 0 38532	$t_{(13)}$ 2.13403	poziom p 0 052463
$E_{s2/RMS(1)}$	-0,52023	-2,00179	0,070587		$E_{s2/RMS(1)}$	-2,19026	-2,15557	0,050441
$\left(E_{s2/RMS(1)}\right)^2$	0,823513	2,54995	0,026997	-	$\left(E_{s2/RMS(1)}\right)^2$	3,1677	2,27166	0,040743
$K_{CPS(2)} = 0,26021-1$,46231· E _{s2/1}	_{RMS(2)} +2,0703	$3 \cdot \left(E_{s2/RMS(2)}\right)$	$(2)^{2}$	$K_{CPS(2)} = 0,156379$	$0,87411 \cdot E_{s2}$	2/RMS(2) +1,315	$537 \cdot \left(E_{s2/RMS(2)}\right)^2$
w wolny	współ.	t ₍₁₁₎	poziom p]	w wolny	współ.	$t_{(13)}$	poziom p
$E_{s2/RMS(2)}$	-1,46231	-5,98474	0,000091	_	$E_{s2/RMS(2)}$	-0,87411	-1,10887	0,287579
$\left(E_{s2/RMS(2)}\right)^2$	2,07033	6,52631	0,000043		$\left(E_{s2/RMS(2)}\right)^2$	1,31537	1,20143	0,251015
$K_{CPS(3)} = 0,29688-1$,68292· E _{s2/1}	+2,4224	$7 \cdot \left(E_{s^{2/RMS}(3)}\right)$	$\left(\right)^{2}$	$K_{CPS(3)} = 0,41444-2$	$2,43094 \cdot E_{s2/}$	_{RMS(3)} +3,6080	$08 \cdot \left(E_{s2/RMS(3)}\right)^2$
	współ.	t ₍₁₁₎	poziom p]		współ.	t ₍₁₃₎	poziom p
w. wolny	0,29688	2,32826	0,039992	-	w. wolny	0,41444	2,89772	0,012462
$E_{s2/RMS(3)}$	-1,68292	-2,33968	0,039194		$E_{s2/RMS(3)}$	-2,43094	-2,93318	0,011642
$\left(E_{s2/RMS(3)}\right)^2$	2,42247	2,44623	0,032462		$\left(E_{s2/RMS(3)}\right)^2$	3,60808	3,09088	0,008596
Kcpsa	$f(E_{idx})$	$K_{CPS(2)}$; $f(E_{idx})$	K _{CPS(3)} ; f	(E_{idx})	Kcpsa	$f(E_{idx})$	$K_{CPS(2)}$: $f(E_{idx})$	$K_{CPS(3)}$; $f(E_{idx})$
R 0,8735	$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$					94 (),512654	0,77961
$R^2 = 0,7630$	R ² 0,76308 0,88814 0,483215				R ² 0,5259	06 (),262814	0,60779
$R^{2}_{skor.} = 0,7200$	$\frac{10}{40}$ 0	,86780	0,389254		$R^2_{skor.} = 0,4529$	69 (60 (0,149401	0,54745
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	6 0	00001	0.026498		$\Gamma_{(2,13)}$ 7,2103 p 0,0078		0.137800	0.00228
$F_{kr(2,11)} = 3,98$ $t_{kr(0,05;11)} = 2,2010$	_	,			$F_{kr(2,13)} = 3,81$ $t_{kr(0,05;13)} = 2,1604$,	

Tab. 4.8.89. Zmiany wartości geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej ściernicy (K_{CPS}) w funkcji parametru typu $E_{s2/RMS}$

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.05$.

T1-250x32x98-9	9A60J7V-4	2m/s,	0.005		T1-250x32x98-99A60M7V-42m/s,			
NC10 (60 \pm 2) HR	$C, v_s = 27,5$	$5 [m/s], a_e =$	0,03 [mm],		NC10 (60±2) HRC, $v_s = 27,5$ [m/s], $a_e = 0,03$ [mm], $f_a = 0,3$ [mm/skok], $Q_c = 3 \times 10^{-3}$ [m ³ min ⁻¹]			
$J_a = 0,3$ [IIIII/SKO	$[x_j, Q_c - 5^{\lambda_j}]$]		$J_a = 0,3$ [IIIII/SKO	K], $Q_c = 3^{1}$]
				$v_{ft} = 14$	[m/min]			
0,075	out 1				0,06	• • • • •		nout 1
	owt. 2			-	0.05	^		• powt. 2
0,060 p	owt. 3		8	-	-			▲ powt. 3 .
0.045			~		0,04		•	
s,	Δ	2		-	् हु 0,03	•		
0,030	×			_	~			
- 4				-	0,02			
0,015				-	0,01			
A CONTRACTOR	-0							
0 0,0	5 0,10 0	,15 0,20	0,25 0,30	0,35	0 0,02	0,04 0,06	0,08 0,10 0,	,12 0,14 0,16 0,18
		E _{skø/RMS}					Ε _{skβ/RMS}	
$K_{CPS(l)} = 0,004325 +$	-0,19417· E _{st}	$k_{\beta/RMS(1)}$ -0,16	$22 \cdot (E_{Sk\beta/RMS})$	$_{1)})^{2}$	$K_{CPS(1)} = 0,00504 + 0$	0,36782 $\cdot E_{_{Skf}}$	_{3/RMS(1)} -1,558	$883 \cdot \left(E_{Sk\beta/RMS(1)}\right)^2$
	współ.	t ₍₁₁₎	poziom p			współ.	t ₍₁₃₎	poziom p
w. wolny	0,004325	0,826072	0,426317		w. wolny	0,00504	0,64450	0,530461
$E_{Sk\beta/RMS(1)}$	0,19417	1,693512	0,118451		$E_{_{Sk\beta/RMS(1)}}$	0,36782	1,58128	0,137830
$\left(E_{Sk\beta/RMS(1)}\right)^2$	-0,1622	-0,49899	0,627613		$\left(E_{Sk\beta/RMS(1)}\right)^2$	-1,55883	-1,18019	0,259071
$K_{CPS(2)} = 0,00731-0$,0377 $\cdot E_{_{Sk\beta/K}}$	_{RMS(2)} +0,9373	$8 \cdot \left(E_{Sk\beta/RMS(2)} \right)$))2	$K_{CPS(2)} = 0,00183 + 0$	0,35855 $\cdot E_{_{Sk\mu}}$	_{3/RMS(2)} -1,32	$572 \cdot \left(E_{Sk\beta/RMS(2)}\right)^2$
	współ.	t ₍₁₁₎	poziom p			współ.	t ₍₁₃₎	poziom p
w. wolny	0,00/31	2,822067	0,016606		w. wolny	0,00183	0,28621	0,779228
$E_{Sk\beta/RMS(2)}$	-0,0377	-0,659371	0,523222		$E_{Sk\beta/RMS(2)}$	0,35855	1,95472	0,072466
$\left(E_{Sk\beta/RMS(2)}\right)^2$	0,93738	4,061453	0,001879		$\left(E_{Sk\beta/RMS(2)}\right)^2$	-1,32572	-1,20127	0,251077
$K_{CPS(3)} = 0,003 + 0,3$	0437 $\cdot E_{Sk\beta/R}$	_{MS(3)} -1,0684·	$\left(E_{Sk\beta/RMS(3)}\right)$	2	$K_{CPS(3)} = -0,0137+2$	2,1873 $\cdot E_{_{Sk\beta/I}}$	_{RMS(3)} -29,328	$9 \cdot \left(E_{Sk\beta/RMS(3)}\right)^2$
	współ.	t ₍₁₁₎	poziom p			współ.	t ₍₁₃₎	poziom p
w. wolny	0,003	0,626531	0,543750		w. wolny	-0,0137	-0,83781	0,417273
$E_{_{Sk\beta/RMS(3)}}$	0,30437	1,842593	0,092481		$E_{_{Sk\beta/RMS(3)}}$	2,1873	2,13703	0,052176
$\left(E_{Sk\beta/RMS(3)}\right)^2$	-1,0684	-0,9791	0,348570		$\left(E_{Sk\beta/RMS(3)}\right)^2$	-29,3289	-2,08876	0,056962
Konga	$f(E_{i,t})$	$K_{CBS(2)}$ f(F)	Kansan fl	E	Kanad	$f(E_{id})$	$K_{CBS(2)} \cdot f(F_{++})$	$K_{CBS(2)}$: f(F.,)
R 0,8540	4 0	,96872	0,675899	- (ax)	R 0,4538	83 (),628246	0,509928
R^2 0,7293	9 0	,93841	0,456840		R^2 0,2060	010 (),394694	0,260027
$R^2_{skor.} = 0,6801$	8 0	<u>),92721</u>	0,358083		$R^2_{skor.} = 0,0838$	57 C),301569	0,146185
$F_{(2,11)}$ 14,824	10 8 5 0	5,80335 20E-07	4,625921		$F_{(2,13)}$ 1,6864	99 4 54 0	1,238362 1,038268	2,284103
	5 2	.,2011-07	0,034042		p 0,2232		,030200	0,141222
$F_{kr(2,11)} = 3,98$					$F_{kr(2,13)} = 3,81$			
$t_{kr(0,05;11)} = 2,2010$					$t_{kr(0,05;13)} = 2,1604$			

Tab. 4.8.90. Zmiany wartości geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej ściernicy (K_{CPS}) w funkcji parametru typu $E_{Sk\beta/RMS}$

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono parametry/współczynniki regresji statystycznie istotne dla przyjętego poziomu istotności α = 0,05.

W tych warunkach proporcja skośności rozkładu wartości skutecznej emisji akustycznej do samego sygnału EA_{RMS} była na tyle istotna, że bardzo dokładnie odzwierciedliła zmiany makro- i mikrogeometryczne na CPS. W efekcie opisywany parametr, najdokładniej z dotychczas przeanalizowanych, odtwarzał zmiany wskaźnika K_{CPS} . Oznacza to, że może on w pewnym zakresie zastąpić pomiary geometryczne i z dużym prawdopodobieństwem wyznaczyć realne zdolności skrawne ściernicy.

Ocena zgodności zmian dwóch parametrów wyjściowych metodą porównywania ich podobieństwa

Dotychczasowe wyniki badań wykazały istnienie zależności o różnym stopniu korelacji pomiędzy parametrami wyjściowymi procesu szlifowania. Analizując przebiegi czasowe poszczególnych parametrów, otrzymane wyniki statystyczne wydają się często zaniżone.

Z powyższego wywnioskowano, że określenie zależności występującej pomiędzy przebiegami zmienności omawianych do tej pory parametrów, poprzez wyznaczenie funkcji regresji i współczynnika korelacji, jest w wielu przypadkach co najmniej niewystarczające (może dać błędne wnioski). Zdecydowano się wiec określić podobieństwo przebiegu zmienności wybranych parametrów, czego przykład zamieszczono na rys. 4.8.56 (D269).



Rys. 4.8.56. Przykład porównania podobieństwa przebiegu zmienności dla parametru $K_{\beta}(EA_{RMS})$ oraz zmian wartości naprężeń maksymalnych w warstwie wierzchniej w funkcji czasu pracy ściernicy

Określając stopnień podobieństwa kolejnych linii składających się na cały przebieg zmienności parametrów, w tym opisując konsekwencję zmian, jakie następują między nimi, poprzez wyznaczenie kąta pochylenia oraz jego kierunku ("+" wznoszenie lub "-" opadanie) dla każdej linii łączącej kolejne punkty pomiarowe, można określić zgodność zmian zachodzących pomiędzy analizowanymi czynnikami. W powyższym przykładzie podobieństwo zmian w domenie czasu, zachodzące między naprężeniami maksymalnymi warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego, a parametrem kurtoza rozkładu *beta* sygnału EA, można ocenić na poziomie 80%. Jest to dużo, zważywszy różnorodność źródeł emisji akustycznej w procesie szlifowania, jak i ilość informacji zawartej w sygnale EA.

Zjawisko występowania tego podobieństwa i analogię w zmianach lokalnych, można wykorzystać m.in. w celu zapobiegania gromadzenia się wysokich naprężeń (szczególnie niekorzystnych, czyli rozciągających: $+\sigma_{max}$) w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego oraz oceny okresu trwałości narzędzia.

Szczegółowy opis proponowanej metody oceny zgodności ZG oraz analizę porównującą przebiegi wybranych parametrów wyjściowych procesu, przedstawiono w załączniku do niniejszej rozprawy (rozdz. Z.5).

Wnioski z analizy współczynników energetycznych sygnału EA

Analizując powyższe wyniki, można wykazać istnienie sporadycznych relacji o bardzo wysokiej korelacji pomiędzy zmianami geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej, a zmianami wartości wskaźników typu E_{idx} . W tych przypadkach wysokie wartości współczynników determinacji (R^2), szczególnie w przypadku najniższej wartości posuwu stycznego stołu (v_{ft}), świadczą o dobrym dopasowaniu równań regresji do danych doświadczalnych, a istotność statystyczna występująca pomiędzy zmiennymi potwierdzona została poprzez wartości statystyki *t-Studenta*, znacznie przekraczając wartość krytyczną oraz przez niskie wartości *poziomu-p*. Powyższe aspekty potwierdza występowanie wartości statystyki *Fishera-Snedecora*, która znacznie przekracza wartość krytyczną ($F > F_{kr}$).

Do parametrów, które częściowo (w określonych warunkach pracy narzędzia) były powiązane ze zmianami geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej (K_{CPS}), a tym samym ze stanem czynnej powierzchni ściernicy i zjawiskami zachodzącymi w strefie szlifowania należą: $E_{s2/RMS}$ oraz $E_{Sk\beta/RMS}$. Jednakże wyniki analiz generalnie wykazały, że oprócz możliwości określenia ogólnego stopnia zużycia (poprzez wcześniej omówione wyznaczenie wartości granicznych dla konkretnych sygnałów), opisywane parametry E_{idx} , nie wykazują silnych i jednoznacznych korelacji ze wskaźnikiem geometrycznym K_{CPS} . Największą niedogodnością w posługiwaniu się funkcjami określającymi bezpośredni związek pomiędzy wybranymi parametrami E_{idx} a przewidywaną wartością K_{CPS} , jest brak pomiędzy nimi stałej zależności o wysokim (statystycznie istotnym) dopasowaniu, co wykazały kolejne powtórzenia eksperymentów.

Oznacza to, że za pomocą parametrów E_{idx} nie możemy wnioskować jednoznacznie o wartościach wskaźnika geometrycznych zdolności skrawnej (K_{CPS}). Możemy jedynie określić kierunek jego zmian – wzrost albo spadek. To z kolei świadczy o tym, że parametry E_{idx} nie odzwierciedlają zmieniających się zdolności skrawnej ściernic w stopniu pozwalającym na zastąpienie nim pomiarów geometrycznych czynnej powierzchni ściernicy i wyznaczenie choćby przybliżonej wartości wskaźnika K_{CPS} .

Z drugiej jednak strony, co wykazano we wcześniejszej części niniejszego rozdziału, idealnie spełniają swoją rolę w przypadku określania momentu przekroczenia wartości granicznej, a tym samym dokonania oceny okresu trwałości ściernic z wykorzystaniem wartości skutecznej sygnału EA.

4.9. Wnioski z badań właściwych

W trakcie realizacji badań doświadczalnych zrealizowano postawione cele pracy. Tym samym, przeprowadzone badania właściwe procesu szlifowania powierzchni płaskich pozwoliły określić, jak zużycie narzędzia wpływało na rejestrowane czynniki wyjściowe procesu, w tym sygnał emisji akustycznej oraz rezultaty obróbki. Szeroka analiza wyników badań pozwoliła określić wzajemne relacje występujące pomiędzy geometrycznymi skutkami zużycia ściernicy, a rejestrowanymi w trakcie procesu sygnałami. Wyznaczono także zbiór najkorzystniejszych parametrów, które ze względu na stopień korelacji, najlepiej opisują zmiany zachodzące w strefie szlifowania zarówno w odniesieniu do ściernicy, jak i przedmiotu obrabianego.

Ostatecznie, wyniki badań doświadczalnych i ich analiza umożliwiły sformułowanie istotnych wniosków, podzielonych na grupy tematyczne ściśle powiązane z poszczególnymi etapami badań doświadczalnych i analizy ich wyników. Poniżej zebrano najbardziej znaczące wnioski, jakie udało się wyciągnąć z przeprowadzonej oceny okresu trwałości ściernic przy pomocy wybranych parametrów, w tym z wykorzystaniem emisji akustycznej, jako metody pomiarowej procesu obwodowego szlifowania płaszczyzn.

Ocena zużycia ściernicy i wyznaczenie jej okresu trwałości na podstawie zmierzonych zmian parametrów geometrycznych opisujących stan czynnej powierzchni ściernicy.

- 1. Analiza zmian geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej (K_{CPS}), który ujmuje związki między parametrami charakterystycznymi dla mikro- i makrogeometrii CPS, wykazała, że wraz z upływem czasu pracy badanych ściernic następuje spadek tego parametru. Świadczy to o pogarszaniu się stanu powierzchni czynnych, a w konsekwencji własności skrawnych ściernic. Zmiany te są szczególnie intensywne w początkowej fazie ich pracy.
- 2. W przebiegach geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej (K_{CPS}) dla obu ściernic zanotowano istnienie lokalnych, okresowych wzrostów wartości zdolności skrawnej, które podyktowane były wytrzymałościowym charakterem pracy ściernic, co wiązało się z za-istnieniem procesów samoostrzenia.
- 3. Analiza zmian czynnej powierzchni ściernicy w skali mikrogeometrii wykazała, że ze względu na wytrzymałościowy charakter zużycia narzędzia, większość parametrów opisujących zmiany CPS charakteryzowało się dużymi rozrzutami oraz mało wyraźnymi tendencjami zmian.

Pośrednie określenie postępującej utraty zdolności skrawnej ściernicy poprzez wyznaczenie trendu zmian, zachodzących zarówno w warstwie wierzchniej, jak i chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego.

- 4. Badania wykazały istnienie ścisłego związku zachodzącego pomiędzy otrzymanymi w trakcie szlifowania zmianami geometrycznymi CPS, a cechami wysokościowymi powierzchni obrabianych, wyrażonymi poprzez parametr $R_{a(w)}$. Wszystkie czynniki, które wpływały na zmniejszenie chropowatości profili CPS (tj. niższa wydajność objętościowa szlifowania i dłuższy czas pracy ściernicy) powodowały równocześnie zmniejszenie chropowatości przedmiotu.
- 5. Wyniki badań świadczą o największym udziale parametru B_{kr} (czynna szerokość ściernicy) w kształtowaniu się wartości chropowatości przedmiotu obrabianego (parametr $R_{a(w)}$). Oznacza to, że największe znaczenie w kształtowaniu mikrogeometrii powierzchni próbek posiadały zmiany geometryczne CPS zachodzące w skali makro. Parametr ten bezpośrednio związany jest z polem styku ściernicy z powierzchnią obrabianą.
- 6. Wyniki analiz wskazują, także na większy udział starcia względnego wzniesień profilu CPS (parametr l_{st}) w kształtowaniu średniego odstępu miejscowych wzniesień profilu chropowatości $RS_{m(w)}$. Co oznacza, że starcie ziaren ściernicy mogło mieć znaczący wpływ na kształtowanie się wzdłużnych parametrów profili powierzchni szlifowanych.
- 7. Szczegółowa analiza wyników badań wykazała, że o wartościach rozciągających naprężeń własnych ($+\sigma_{max}$) w warstwie wierzchniej szlifowanego przedmiotu można wnioskować, jedynie łącząc analizę zmian parametrów geometrycznych CPS w skali makro (B_{kr}) oraz w skali mikro (l_{st}).
- 8. Wszystkie rozpatrywane ściernice wykazały istnienie wysokiej korelacji pomiędzy stanem czynnej powierzchni ściernicy, a dokładnie jej postępującym zużyciem (parametr K_{CPS}), a wynikami obróbki w postaci maksymalnych wartości rozciągających naprężeń własnych zalegających w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego. Ponadto, istnieją uzasadnione przesłanki, że wyznaczone zależności można wykorzystać do ilościowego wyznaczenia naprężeń własnych (przynajmniej dla rozpatrywanego zakresu badań).

Wyznaczenie trendu w zmianach składowej stycznej oraz normalnej siły szlifowania i powiązanie ich ze zużyciem czynnej powierzchni ściernicy.

- 9. Wyniki badań i ich dogłębna analiza wykazały wyraźną korelację zachodzącą pomiędzy rejestrowanymi w trakcie przebiegu procesu wartościami składowych siły szlifowania, a określonymi parametrami marko- oraz mikrozużycia CPS, wyrażonymi parametrami B_{kr} (długość czynna krawędzi ściernicy) oraz l_{st} (starcie wierzchołków).
- 10. Otrzymane zależności pomiędzy wartościami składowych F_c i F_n siły szlifowania, a szerokością czynną ściernicy (B_{kr}) oraz średnim odcinkiem starcia wierzchołków zarysu czynnej powierzchni ściernicy (l_{st}) nie charakteryzowały się wysoką korelacją. Jednakże, wyniki badań wykazały istnienie bliżej nieokreślonej zależności pomiędzy rejestrowanymi składowymi siły, a wskaźnikiem zdolności skrawnej (K_{CPS}). Zaobserwowano wyraźną tendencję wzrostu wartości sił wraz z upływem czasu szlifowania i stopniową utratą zdolności skrawnej ściernic. Analiza otrzymanych korelacji wskazuje na niskie dopasowanie otrzymanego modelu do danych (wartości wskaźników R), co potwierdzone jest istnieniem nieznaczących statystycznie współczynników regresji w większości przypadków.
- 11. Wyniki analiz stanowią bardzo wyraźnie, że siły w procesie szlifowania, w swojej czystej formie, bez odniesienia do innych wielkości wyjściowych procesu, nie oddają jednoznaczności w ocenie okresu trwałości narzędzia ze względu na trudność interpretacji wyników przy tak niskiej zgodności parametrów analizy statystycznej.
- 12. Zrealizowane badania wykazały, że zmieniające się w funkcji czasu pracy ściernicy wartości współczynników obciążenia jednostkowego powierzchni kontaktu składowymi siły szlifowania (q_{Fn} i q_{Fc}) stanowią miarę intensywności oddziaływania ściernicy na przedmiot obrabiany, pozwalając na wnioskowanie o rzeczywistych (odniesionych do wielkości powierzchni, na którą oddziałują) oddziaływania sił w strefie szlifowania.
- 13. Przeprowadzona analiza wykazała, także możliwość określenia charakteru zużycia narzędzia w oparciu o zmiany wskaźników q_{Fn} oraz q_{Fc} . W trakcie szlifowania z przewagą zużycia wytrzymałościowego ściernicy, rejestrowano znaczący spadek wartości q_{Fn} , a w przypadku zużycia ściernego, charakterystycznego szczególnie w końcowej fazie zużycia ściernic elektrokorundowych, wskaźnik ten spadał powoli lub utrzymywał się w określonej zmienności.
- 14. Wskaźniki jednostkowego obciążenia strefy szlifowania składowymi siły szlifowania wykazały się względnie wysoką korelacją z parametrami mikro- (l_{st}) i makrogeometrii (B_{kr}) czynnej powierzchni ściernicy. Relacja ta odzwierciedliła się, także w przypadku odniesienia wskaźników q_{Fn} i q_{Fc} do wskaźnika zdolności skrawnej K_{CPS} .

Określenie relacji pomiędzy składowymi siły szlifowania, a parametrami chropowatości powierzchni oraz naprężeniami w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego.

15. Analiza relacji parametrów chropowatości powierzchni obrabianych i sił szlifowania (F_c, F_n) , wykazała niemal całkowity brak zależności. Oznacza to, że wartości poszczególnych składowych siły szlifowania są całkowicie nieprzydatne w ocenie jakości geometrycznej powierzchni obrabianej i nie mogą bez powiązania z innymi elementami w żadnym stopniu zastąpić pomiarów metrologicznych. Dopiero jednoczesna interpretacja zmian wartości obu składowych siły szlifowania może być przydatna w kwestii wnioskowania o kierunku zmian parametrów chropowatości powierzchni obrabianej. Jednakże,

i w tym przypadku nie odnotowano na tyle wysokiej korelacji określonej parametrami R oraz R^2 , aby uznać ją ściśle jednoznaczną.

16. Analiza zależności zachodzącej pomiędzy naprężeniami, a wartościami składowych siły szlifowania, sugeruje że należałoby się spodziewać proporcjonalnego wzrostu naprężeń w warstwie wierzchniej wraz ze zmianami rejestrowanych wartości sił. Jednakże badania ukazały brak ścisłych zależności między składowymi siły szlifowania, a oszacowanymi naprężeniami rozciągającymi w warstwie wierzchniej przedmiotów szlifowanych. Na wielkość powstających naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotów obrabianych w przeprowadzonych badaniach, wpływ mały nie tylko wartości sił, ale też wielkość powierzchni, na które oddziałują (czyli obciążenie ziarna w strefie szlifowania). Dlatego też, badania wykazały istnienie statystycznego związku pomiędzy rejestrowanymi wartościami wskaźników obciążenia jednostkowego powierzchni składowymi siły szlifowania, a wartościami naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego. Oznacza to, że wskaźniki q_{Fc} oraz q_{Fn} mogą stanowić korzystny parametr do pośredniej oceny zmian naprężeń w warstwie wierzchniej.

Określenie korelacji pomiędzy parametrami EA, a wielkościami charakteryzującymi postępujące zużycie czynnej powierzchni ściernicy.

- 17. Odnosząc wartości sygnałów emisji akustycznej tylko do zmian geometrycznych CPS, stwierdzono, że wartości *EA_{RMS}* wyraźnie maleją w momentach, gdy ściernica wykazywała większą zdolność skrawną, czyli gdy charakteryzowała się dużą liczbą wierzchołków ziaren w strefie szlifowania o względnie dużych wysokościach i ostrych krawędziach (czyli małym starciu). Odwrotną tendencję zanotowano dla postępującego tępienia ściernic. Wtedy sygnały *EA_{RMS}* przybierały większe wartości (rosnące w funkcji czasu pracy ściernic).
- 18. W odniesieniu jedynie do geometrycznych skutków zmian topografii CPS, sygnały emisji akustycznej zachowały się wg zależności 4.8.17 i 4.8.18 (D167):

$$EA_{RMS} \uparrow = f\left(S_{st} \downarrow^2, a_{zsr} \uparrow^2, R_c \downarrow^2, l_{st} \uparrow^2, B_{kr} \uparrow^2\right),$$
$$EA_{RMS} \downarrow = f\left(S_{st} \uparrow^2, a_{zsr} \downarrow^2, R_c \uparrow^2, l_{st} \downarrow^2, B_{kr} \uparrow^1\right).$$

Ponieważ, jednak sygnał EA kumulował w sobie, także fale sprężyste emitowane przez materiał poddany obróbce, czyli jego postać nie zależała tylko od zmian topografii CPS, to powyższe zależności należy uznać za poglądowe i stanowiące duże uproszczenie analizy przebiegu procesu (jednakże o wysokim poziomie korelacji, zbliżonym do 80%).

- 19. Analiza statystyczna wartości skutecznej sygnału EA wykazała, że współczynnik koncentracji rozkładu *beta* ($K_{\beta}(EA_{RMS})$) jest najbardziej korzystnym parametrem, który można zastosować do opisu zmian związanych ze zużyciem ściernicy. Wynika to z faktu jego wysokiej korelacji z geometrycznym wskaźnikiem zdolności skrawnej (K_{CPS}).
- 20. Istotną informacją wynikającą z analizy otrzymanych relacji, jest proporcjonalny wpływ parametrów geometrycznych CPS na wartości sygnału EA_{RMS} . Im większa długość krawędzi ściernicy (B_{kr}) lub wierzchołków ziaren (l_{st}) , tym wartości impulsów emisji akustycznej przyjmowały większe wartości. Przy czym wyniki wykazały, że znacznie większy udział w kształtowaniu ostatecznej wartości sygnału EA posiadał parametr B_{kr} (w porównaniu do starcia wierzchołków ziaren, l_{st}). Świadczy to o silniejszym wpływie zmian w skali makro na otrzymywane wyniki. Wpływ starcia wierzchołków ziaren (l_{st})

był natomiast proporcjonalny względem obliczonych wartości wariancji sygnału EA. Dlatego też, wzrost wartości wariancji sygnału EA_{RMS} może być zinterpretowany, jako zarejestrowanie zużycia ściernego ściernicy.

- 21. Najwyższą jakość predykcji modelu otrzymano dla parametru kurtoza rozkładu *beta* sygnału EA_{RMS} . Niezależnie od formy zużycia ściernicy, wraz z postępującą utratą zdolności skrawnej następowała większa koncentracja wartości (wzrost parametru $K_{\beta}(EA_{RMS})$) wokół wartości średniej. W przypadku ściernicy o nominalnie mniejszej twardości (99A60J7V), funkcję nadrzędną przejmowały zmiany makrogeometryczne CPS, a w przypadku ściernicy relatywnie twardej (99A60M7V) – zmiany mikrogeometrii. Otrzymane wyniki, odzwierciedlają stan faktyczny odnotowany w trakcie badań eksperymentalnych, gdyż ściernica 99A60J7V pracowała z przewagą zużycia wytrzymałościowego, więc do utraty zdolności skrawnej w jej przypadku przyczynił się głównie ubytek kolejnych ziaren ściernych. Natomiast dla ściernicy 99A60M7V odnotowano przewagę zużycia ściernego, co oznacza, że uległa ona głównie starciu wierzchołków ziaren. Oba charaktery pracy i formy zużycia idealnie odzwierciedliły się w zarejestrowanym kształcie zmienności współczynnika koncentracji.
- 22. Analiza wyników wykazała istnienie relacji o bardzo wysokiej korelacji pomiędzy zmianami geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej (K_{CPS}), a zmianami wartości skutecznej EA. Wyniki analiz wyraźnie wykazują, że wraz z postępującą utratą zdolności skrawnej (spadek wskaźnika), rejestrowano coraz większe wartości skuteczne sygnału emisji akustycznej. Oznacza to, że w przypadku dobrej skrawności, gdy impulsy EA pochodzą głównie od odkształceń plastycznych materiału obrabianego (tworzenie wióra), to rejestrowane wartości skuteczne sygnału EA są względnie niskie, a wzrastają gdy ściernica ulega zużyciu wytrzymałościowemu lub uległa już całkowitemu zużyciu i zaczyna głównie trzeć czynną powierzchnią o materiał obrabiany (wtedy to może, także nastąpić niewielki spadek wartości EA_{RMS}).
- 23. Analiza kształtu oraz położenia rozkładu sygnału emisji akustycznej, może być z powodzeniem wykorzystana do wyznaczania końca okresu trwałości ściernicy, jak również można obserwować poprzez odpowiednią interpretację zmian wartości współczynników K_{β} i $S_{k\beta}$ kolejne lokalne etapy utraty oraz przywracania zdolności skrawnej CPS zachodzące w miarę upływu czasu szlifowania.

Określenie relacji pomiędzy wybranymi pochodnymi sygnału emisji akustycznej, a parametrami chropowatości powierzchni oraz maksymalnymi naprężeniami zalegającymi w warstwie wierzchniej przedmiotu poddanego obróbce.

- 24. Analiza wyników statystycznych wykazała, że najlepszą korelacją z mikrogeometrycznymi parametrami powierzchni obrabianej wykazały się parametry statystyczne sygnału EA należące do grupy opisującej rozkład wartości sygnału, a w szczególności przedstawiające miarę natężenia (skupienia) poszczególnych elementów wokół wartości średniej, głównie: $K(EA_{RMS})$, $K_{\beta}(EA_{RMS})$ i $S_{k\beta}(EA_{RMS})$). Oznacza to, że pomimo otrzymanej dość niskiej korelacji sygnału EA z parametrami chropowatości powierzchni otrzymanej w wyniku procesu szlifowania, impulsy EA przenoszą część informacji, także związanej z kształtowaniem się geometrii powierzchni obrabianej.
- 25. Zależność parametru $R_{a(w)}$ do zmian, rejestrowanego w trakcie przebiegu procesu, współczynnika kurtoza rozkładu *beta* dla sygnału EA_{RMS} była wyraźna i charakteryzowała się relatywnie wysokimi wartościami współczynnika determinacji. Linie trendu, w przeciwieństwie do relacji $R_{a(w)}=f(K(EA_{RMS}))$, charakteryzowały się odwrotną proporcjonalno-

ścią pomiędzy zmiennymi. Wzrost współczynnika $K_{\beta}(EA_{RMS})$, który następował wraz z utratą zdolności skrawnej, prawie zawsze przekładał się na spadek zmierzonych po szlifowaniu wysokościowych cech chropowatości powierzchni próbek ($R_{a(w)}$). Analiza wyników dotycząca określenia zależności występujących pomiędzy współczynnikiem skośności rozkładu *beta* dla sygnału EA_{RMS} , wykazała podobne cechy (oprócz odwrotnego kierunku zmian). Oznacza to, że współczynnik $S_{k\beta}(EA_{RMS})$ może być wykorzystany (obok parametru $K_{\beta}(EA_{RMS})$), jako kolejny element w trakcie analizy sygnału emisji akustycznej w celu określania przybliżonej wartości $R_{a(w)}$.

- 26. Wyniki badań wykazały brak relacji pomiędzy sygnałem EA, a cechami wzdłużnymi profilu chrapowatości, wyrażonymi przez średni odstęp miejscowych wzniesień profilu powierzchni próbek ($RS_{m(w)}$). Biorąc pod uwagę tylko powiązanie EA z parametrem $RS_{m(w)}$, sygnał EA nie stanowi dobrego odnośnika zmian mikrogeometrycznych występujących dla poszczególnych profili chropowatości powierzchni obrabianej. Jednakże, pomimo braku wiążących korelacji w sferze ogólnej, analiza wyników statystycznych regresji wykazała, że przypadkowe powiązania wystąpiły głównie dla współczynnika spłaszczenia $K(EA_{RMS})$, kurtoza $K_{\beta}(EA_{RMS})$ oraz skośności $S_{k\beta}(EA_{RMS})$ rozkładu *beta* dla sygnału emisji akustycznej.
- 27. Wysoka zbieżność pomiędzy wartością skuteczną emisji akustycznej, a naprężeniami własnymi w warstwie wierzchniej szlifowanych przedmiotów oraz czasem pracy ściernicy w postaci: $K_{\beta}(EA_{RMS}) = f(\sigma_{max}, t)$, wskazuje, że uogólniona postać modelu z powodzeniem może zostać praktycznie wykorzystana do diagnozowania stanu narzędzia w procesie szlifowania. Zastosowanie odpowiednich metod przetwarzania sygnału EA, powinno pozwolić na wykorzystanie opracowanych zależności w systemie diagnostyki przebiegu procesu szlifowania uzupełniając go o możliwość przewidywania wartości naprężeń, a tym samym zminimalizowanie ryzyka otrzymania niepożądanych rezultatów obróbki w postaci materiałów o niewłaściwych własnościach fizycznych.

<u>Ustalenie współczynnika do oceny ilości energii emisji akustycznej przypadającej na jednost-</u> kową powierzchnię kontaktu ściernica – przedmiot obrabiany oraz powiązanie go z okresem trwałości ściernicy oraz jakością powierzchni poddanej obróbce.

- 28. Zaproponowany wskaźnik energii impulsów emisji akustycznej przypadającej na jednostkową powierzchnie kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym (q_{RMS}) stanowi korzystny parametr do oceny przebiegu procesu, co wynika z jego relatywnie wysokiej korelacji z parametrami geometrycznymi CPS.
- 29. Wskaźnik q_{RMS} stanowi korzystną alternatywę dla stosowanych dotąd wskaźników jednostkowego obciążenia strefy składowymi siły szlifowania (q_{Fc} , q_{Fn}).
- 30. Wskaźnik q_{RMS} , ze wszystkich przeanalizowanych parametrów sygnału EA, charakteryzuje się najlepszą jakością predykcji wartości mikrogeometrycznych cech powierzchni szlifowanej.

Propozycja wskaźników sygnału EA, które z pominięciem pomiarów parametrów geometrycznych powierzchni ściernicy, pozwolą dokonać przybliżonej oceny zużycia ściernicy.

31. W trakcie analizy wyników badań opracowano szereg wskaźników, które odnosiły się tylko do jednej (modele 1. rzędu) lub dwóch różnych (modele 2. rzędu) pochodnych sy-

gnału EA. Spośród wielu przetestowanych modeli, tylko kilka charakteryzowało się wysoką korelacją ze stanem CPS i może posłużyć do oceny stopnia zużycia narzędzia.

- 32. Parametrami, których analiza może z powodzeniem posłużyć do opisu zmian zachodzących w strefie szlifowania, a w szczególności do określenia aktualnych zdolności skrawnej CPS i momentu ich utraty w trakcie przebiegu procesu szlifowania, okazały się opracowane modele $\hat{y}_{S_{k\beta}}$, $E_{s2/RMS}$ oraz $E_{Sk\beta/RMS}$. O użyteczności powyższych deskryptorów, świadczy trend zmian ich wartości w całym okresie trwałości ściernicy, silnie nawiązujący do zmian odnotowanych dla parametru opisującego utratę zdolności skrawnej przez czynną powierzchnię (K_{CPS}).
- 33. Najkorzystniejsze wyniki, które świadczą o względnie wysokim stopniu korelacji otrzymano w przypadku zestawienia zmian wartości geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej ściernicy (K_{CPS}) w funkcji parametru $E_{sk\beta/RMS}$. W tym przypadku odnotowano niemal prostoliniową tendencję do kształtowania się zależności pomiędzy zmiennymi. Obie zmienne są proporcjonalne względem siebie. Wzrost lub spadek jednej z nich, odzwierciedla się w podobnej reakcji w drugiej zmiennej.
- 34. Ponadto, parametry $\hat{y}_{S_{k\beta}}$ i $E_{Sk\beta/RMS}$ mogą posłużyć do bezwarunkowego określenia okresu trwałości ściernicy, poprzez wyznaczenie dla nich wartości granicznej, której osiągnięcie lub przekroczenie przez rejestrowany sygnał przyniesie efekt w postaci przekazania do systemu kontroli przebiegu procesu informacji o konieczności wymiany ściernicy lub ewentualnie odnowienia jej CPS poprzez zabieg obciągania.
- 35. Wyniki analiz generalnie wykazały, że oprócz możliwości określenia ogólnego stopnia zużycia (poprzez wcześniej omówione wyznaczenie wartości granicznych dla konkretnych sygnałów), opisywane parametry, nie wykazują silnych i jednoznacznych korelacji ze wskaźnikiem geometrycznym K_{CPS}. Oznacza to, że za pomocą tych parametrów nie możemy wnioskować jednoznacznie o wartościach wskaźnika geometrycznych zdolności skrawnej (K_{CPS}). Możemy jedynie określić kierunek jego zmian wzrost albo spadek. Oznacza to, że zaproponowane wielkości nie odzwierciedlają zmieniających się zdolności skrawnej ściernic w stopniu pozwalającym na zastąpienie nim pomiarów geometrycznych czynnej powierzchni ściernicy i wyznaczenie choćby przybliżonej wartości wskaźnika K_{CPS}. Z drugiej jednak strony, idealnie spełniają swoją rolę w przypadku określania momentu przekroczenia wartości granicznej, a tym samym dokonania oceny okresu trwałości ściernic z wykorzystaniem wartości skutecznej sygnału EA.

Powyżej przedstawione wnioski stanowią istotne potwierdzenie słuszności postawionej tezy. Zrealizowane badania udowodniły, że sygnał EA zawiera większą ilość informacji o procesie, niż inne wielkości (np. siła, moc) charakteryzujące przebieg szlifowania. Świadczą one niesprzecznie o dużym znaczeniu poznawczym w zakresie wpływu czasu szlifowania na zużycie narzędzia, jakie posiada rejestracja parametrów sygnału EA w trakcie obróbki.

Przeprowadzone badania i wyniki ich analiz, świadczą w głównej mierze o tym, że sygnał EA niesie ze sobą ilościowe informacje o zjawiskach zachodzących w strefie szlifowania i jest on ściśle powiązany ze zmianami CPS, własnościami fizycznymi warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego, a także częściowo z mikrogeometrycznymi zmianami zachodzącymi na powierzchni próbek.

Udowodniono także, że sygnał EA efektywnie określa chwilowe zdolności skrawne ściernicy, a także z powodzeniem może posłużyć do dokładnego wyznaczania okresu trwało-

ści narzędzia, zastępując w wielu przypadkach najdokładniejszy (i najbardziej pracochłonny) sposób opisu zdolności skrawnej, czyli pomiary mikro- i makrogeometrii CPS.

Analizując jednocześnie wartości parametrów $K(EA_{RMS})$, $K_{\beta}(EA_{RMS})$ oraz $S_{k\beta}(EA_{RMS})$, co obecnie nie stanowi problemu dla systemów informatycznych, można z dużym prawdopodobieństwem określić chwilowy stan narzędzia odnoszący się do jego zdolności skrawnej, a znajomość historii zmian tych parametrów pozwoliłaby na dokonanie jednoznacznej oceny zużycia ściernicy, a także przewidywanie momentu, w którym ściernicę należy wymienić lub ponownie naostrzyć. Ocena taka powinna być względna i odnosić rejestrowane wartości do stanu początkowego lub wcześniej określonych wartości.

W trakcie sterowania procesem szlifowania, w celu zapewnienia odpowiedniej jakości powierzchni obrabianej (niskich chropowatości i naprężeń), należałoby optymalizować przebieg procesu pod kątem rejestrowania względnie wysokich lub niskich wartości odpowiednich parametrów sygnału emisji akustycznej. Jednak z powodu charakteru zmian tych parametrów w trakcie postępującego zużycia ściernic, należałoby równocześnie unikać przekroczenia ich granicznych wartości, gdyż mogłoby to spowodować szlifowanie ściernicą o startych ziarnach i przełożyć się na niekorzystne kształtowanie się ważnych cech warstwy wierzchniej po obróbce.

W badaniach udowodniono istnienie ścisłego związku pomiędzy zmianami CPS, a parametrami sygnału EA. Ponieważ zmiany CPS bezpośrednio oddziaływają na jakość otrzymywanych powierzchni szlifowanych, udowodniono przez to, także istnienie pośredniej korelacji w związku *sygnał EA – powierzchnia obrabiana*. Wyniki badań eksperymentalnych dowiodły, że sygnał EA w związku z ujawnionymi korelacjami, może być z powodzeniem wykorzystany do przewidywania wyników obróbki, w szczególności do oszacowania mak-symalnych wartości naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego.

Aby ustalić dokładne modele zależności pomiędzy sygnałami EA, a parametrami geometrycznymi powierzchni szlifowanej, należałoby przeprowadzić badania znacznie bardziej rozszerzone i skupione tylko na tym zagadnieniu. Aktualne wyniki wykazały korzystne korelacje, czyli takie które z powodzeniem można byłoby zastosować w warunkach przemysłowych jedynie z postępującym zużyciem ściernic i naprężeniami w warstwie wierzchniej.

5 DIAGNOSTYKA ZDOLNOŚCI SKRAWNEJ ŚCIERNICY Z WYKORZYSTANIEM PARAMETRÓW SYGNAŁU EA

Przeprowadzone badania i analiza ich wyników, wyraźnie wykazały, że istnieje ścisła zależność pomiędzy zjawiskami zachodzącymi w strefie szlifowania, a rejestrowanymi sygnałami wyjściowymi procesu. Z pośród przebadanych sygnałów wyjściowych, najlepsze korelacje ze zmianami czynnej powierzchni ściernicy wykazała emisja akustyczna w postaci różnych jej parametrów, co przedstawiono w 4. rozdziale niniejszej rozprawy.

Czynniki wyjściowe, mające swoje źródło w sygnale emisji akustycznej, wykazały bardzo korzystne relacje ze zdolnością skrawną ściernicy (K_{CPS}) oraz z wynikami obróbki. Poza tym, zaobserwowane korelacje były lepsze lub co najmniej równe z tymi, które uzyskano dla składowych siły szlifowania. Wynika to z charakteru EA, która przekazuje bezpośrednie informacje o zjawiskach zachodzących w strefie szlifowania. Ponadto, wybrane parametry statystyczne sygnału EA stanowią miarę ilościową zjawisk zachodzących w strefie szlifowania. Powyższe aspekty wskazują wyraźnie na istnienie możliwości skonstruowania systemu diagnostyki procesu szlifowania, który w oparciu o sygnał emisji akustycznej pozwoli na efektywną ocenę zdolności skrawnej ściernicy oraz określi zakończenie okresu jej trwałości.

Wielość czynników kumulujących się na sam przebieg procesu szlifowania, a w tym, także na wielkość i charakter mierzalnych sygnałów wyjściowych, powoduje, że podjęcie jakiejkolwiek oceny, a w konsekwencji, także decyzji, obarczone jest dużą niepewnością. W takich warunkach umiejętność podejmowania decyzji jest jednym z elementów wyróżniających inteligentne działanie. Budowa systemu diagnostyki, który charakteryzowałby się takimi właściwościami, wymaga użycia odpowiedniego narzędzia wykonawczego. Jednym ze stosowanych w tym celu działań jest wykorzystanie teorii logiki rozmytej i w jej oparciu, zbudowanie systemu wnioskowania rozmytego (FIS - *Fuzzy Inference System*).

Na rysunku 5.0.1 (D279) zaprezentowano proponowany przez autora system nadzorowania, który łączy w sobie nie tylko zadania monitorowania, diagnostyki i sterowania, ale również w pewnym stopniu optymalizacji procesu szlifowania. Ze względu na główny cel realizowany przez system, określono go mianem Systemu Wnioskowania Rozmytego o Stanie Ściernicy (*Grinding Wheel Condition* FIS - GWC-FIS). Jest to systemem hybrydowy, gdyż uwzględnia dwie formy sztucznej inteligencji: wnioskowanie rozmyte odnośnie stanu CPS oraz grupę sztucznych sieci neuronowych¹² (SSN) realizującą zadanie sterowania obciążeniem ściernicy w strefie szlifowania z uwzględnieniem jakościowego kryterium obróbki. Obie części pobierają informacje z centralnej części systemu, w której następuje akwizycja sygnałów ze strefy szlifowania oraz ich obróbka (filtrowanie i analiza statystyczna). Wyniki działania wnioskowania rozmytego oraz sztucznej sieci neuronowej spotykają się w obrębie algorytmicznego działania układu, gdzie podejmowana jest decyzja o kontynuacji obróbki z nową wartością posuwu stycznego stołu szlifierki lub o przerwaniu procesu.

¹² Sztuczna sieć neuronowa (ang.: Artificial Neural Network) – ogólna nazwa struktur matematycznych i ich programowych lub sprzętowych modeli, realizujących obliczenia lub przetwarzanie sygnałów poprzez rzędy elementów, zwanych neuronami, wykonujących pewną podstawową operację na swoim wejściu [Tad1993].



Rys. 5.0.1. Schemat hybrydowego systemu sterowania (GWC-FIS) posuwem wzdłużnym szlifierki z uwzględnieniem chwilowej zdolności skrawnej ściernicy oraz wybranego kryterium jakościowego

Szczegółowy algorytm działania proponowanego systemu GWC-FIS jest następujący:

- 1. Proces obróbki szlifowaniem przebiega w danych warunkach (przy znanych nastawach procesu), a sygnał rejestrowany przez czujnik emisji akustycznej poddany jest wstępnej filtracji i obróbce do postaci wartości skutecznej tego sygnału (EA_{RMS}).
- 2. W tym samym czasie, w sposób ciągły, mierzony jest czas pracy ściernicy.
- 3. Pomiędzy wartością skuteczną sygnału emisji akustycznej (EA_{RMS}), a czynnikami wyjściowymi procesu w postaci geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej ściernicy (K_{CPS}) oraz wynikami obróbki (chropowatość powierzchni i naprężenia warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego) zachodzą ścisłe, współzależne relacje (co udowodniono w rozdziale 4 niniejszej rozprawy).
- 4. System nieprzerwanie przetwarza sygnał analogowy z czujnika EA do postaci cyfrowej w oparciu o stałą czasową. Kolejno napływające dane podlegają akwizycji w pamięci operacyjnej systemu i przetworzeniu statystycznemu do postaci wybranych parametrów. Parametry te dobrano ze względu na ich szczególny charakter i możliwość wykorzystania do oceny przebiegu procesu, a w szczególności do oceny stopnia zużycia narzędzia i przewidywania wyników obróbki (rozdz. 4. niniejszej pracy).
- 5. System porównując wartości kolejnych parametrów EA z wartościami granicznymi, sygnalizuje przekroczenie dopuszczalnej wartości jednego lub wielu parametrów. Przekroczenie przez rejestrowany sygnał wcześniej ustalonych granic (tzw. analiza graniczna) wywołuje określoną reakcję układu sterującego (rys. 5.0.2, D280). W przypadku braku takiego układu, informacja ta trafia do operatora szlifierki.



Rys. 5.0.2. Pomiary sygnału EA i charakterystyczne linie graniczne¹³ do analizy warunków pracy ściernicy zaproponowane w strategii firmy *Nordmann GmbH & Co. KG.*: a) granice stałe, b) granice dynamiczne.

Układy analizy granicznej są już częściowo opracowane, wymagają jednak rozszerzenia ich możliwości. Możliwy jest nawet zakup specjalistycznych modułów monitorujących

¹³ 1 – granica, której przekroczenie jest interpretowane, jako nieprzewidziane zdarzenie (np. uszkodzenie narzędzia, szarpaniu narzędzia lub nagłym intensywnym zużyciu), 2 – granica, której przekroczenie oznacza zbyt szybki kontakt narzędzia z powierzchnią przedmiotu obrabianego (np. bicie przedmiotu obrabianego w wyniku złego zamocowania), 3 – granica wyznaczająca zakończenie procesu obróbki (przełączenie na posuwu roboczy), 4a i 4b – granice minimalne wyznaczające początek i koniec obróbki, 4c – granica prawidłowego akustycznego działania czujnika (szumy własny), 5 – granica dopuszczalnej wartości średniej amplitudy sygnału umożliwiająca rozpoznanie dopuszczalnego zużycia narzędzia, 6 – granice minimalnej wartości średniej amplitudy sygnału, której przekroczenie oznacza zbyt duże zużycie narzędzia lub nieprawidłowe przenoszenie sygnału EA, 7 i 8 – górne i dolne dynamiczne granice konturowe, łączą w sobie funkcje granicy 1, 2, lecz wyznaczone są z większą dokładnością wraz z granicami obejmującymi krzywą pomiaru (podczas obróbki pierwszego przedmiotu w serii produkcyjnej).

do obrabiarek (głównie tokarek i frezarek). Przykładem tego typu urządzenia jest System Monitorowania Narzędzi SEM firmy *Nordmann GmbH & Co. KG*.

- 6. Wyznaczone parametry statystyczne sygnału EA, wraz z informacją o obciążeniu ściernicy, trafiają równolegle do 2. podsystemów wspomagających się sztuczną inteligencją.
- 7. W pierwszym proponowanym podsystemie, działającym jako system ekspertowy¹⁴ wartości ostre zamieniane są na rozmyte (zachodzi tzw. fuzyfikacja). Następnie, na podstawie ustalonej bazy reguł, system dokonuje oceny stanu ściernicy (stopnia jej zużycia) wyznaczając wynikową funkcję przynależności (μ_{wyn}) i przeprowadza defuzyfikację, czyli obliczanie ostrej wartości wynikowej (y^*). Informacja o aktualnym stanie ściernicy (jej oszacowanym zużyciu) trafia do operatora szlifierki i systemu. Szczegółowy opis budowy i zasady działania opisywanej części systemu zamieszczono w rozdz. 5.1 "*Ocena zużycia ściernicy*..." (\Box 282).
- 8. W tym momencie, operator dysponuje dwoma bardzo ważnymi informacjami: pierwszą o przekroczeniu (lub nie) wartości granicznych parametrów EA oraz drugą o stopniu zużycia ściernicy, a w szczególnym przypadku o prawdopodobnym jej całkowitym zużyciu. Na podstawie takich danych, szlifierzowi łatwo podjąć decyzję o kontynuacji procesu, korekty nastaw lub jego przerwaniu i wymianie ściernicy (lub odnowieniu jej zdolności skrawnej poprzez zabieg obciągania). W ostatnim przypadku, system przyjmuje aktualny czas pracy ściernicy, jako okres jej trwałości.
- 9. Część systemu zbudowana ze sztucznych sieci neuronowych ma za zadanie w opracowanym systemie GWC-FIS, realizację dwóch czynności: diagnostykę procesu oraz jego regulację. W tym celu na neurony wejściowe pierwszej sieci podawane są aktualne wartości wybranych parametrów EA oraz obciążenie ściernicy (parametr v_{fl}). Odpowiednio przygotowana struktura sieci oraz przyjęte wagi w trakcie uczenia sztucznej sieci neuronowej, pozwolą na oszacowanie wyników obróbki w postaci wybranego kryterium: chropowatość powierzchni (średnia arytmetyczna rzędnych profilu $R_{a(w)}$) oraz maksymalne naprężenia w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego (σ_{max}).
- 10. System znając kryteria jakościowe oraz ich wartości oszacowane i graniczne (wprowadzone przez operatora przed rozpoczęciem szlifowania), może obliczyć różnicę występującą pomiędzy tymi wartościami. Jeżeli wyznaczona różnica, dla któregokolwiek z kryteriów jakościowych jest ujemna lub zbliżona do zera, układ sterujący w oparciu o sztuczną sieć neuronową wyznaczy zmianę prędkości posuwu, czyli obciążenia ściernicy ($\Delta v_{ft} \neq 0$).
- 11. W ostatniej części analitycznej sytemu sterowania posuwem GWC-FIS, następuje sprawdzenie, czy wyznaczona wartość posuwu mieści się w granicach dopuszczalnych przez daną szlifierkę (informacje te, także wprowadzone są do systemu przed rozpoczęciem obróbki) oraz czy informacja wychodząca z podsystemu logiki rozmytej nie sygnalizuje utraty zdolności skrawnej przez ściernicę. Jeżeli weryfikacja będzie pozytywna, system wysyła nową wartość prędkości posuwu stycznego stołu szlifierki do zespołu sterowania.
- 12. Jeżeli natomiast któreś z kryteriów nie zostanie spełnione, system zatrzyma proces szlifowania i wskaże na konieczność odnowienia CPS lub wymiany ściernicy na nową, czy też ewentualnie korektę wartości granicznych. Dodatkowo system przyjmuje aktualny czas pracy ściernicy, jako jej okres trwałości.

¹⁴ Systemy ekspertowe – złożone programy komputerowe, które na podstawie szczegółowej wiedzy (baza danych opracowana przez eksperta z danej dziedziny) mogą wyciągać wnioski i podejmować decyzje, działając w sposób zbliżony do procesu rozumowania człowieka.

5.1 Ocena zużycia ściernicy z wykorzystaniem systemu FIS

Budowa klasyfikatora stanu zużycia ściernicy, wykorzystującego pojęcia rozmyte, wymagała określenia funkcji przynależności etykiet lingwistycznych i ustalenia bazy reguł decyzyjnych dla odpowiednio wybranego zbioru czynników charakteryzujących proces szlifowania. Jako reprezentatywne parametry i wielkości wyjściowe procesu (na podstawie analizy wyników badań przeprowadzonej w rozdz. 4. niniejszej pracy) wybrano poniższy zbiór wielkości:

- natężenie koncentracji wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej (K(EA_{RMS})),
- parametr kurtoza rozkładu *beta* dla wartości skutecznej sygnału EA ($K_{\beta}(EA_{RMS})$),
- skośność rozkładu beta dla wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej ($S_{k\beta}(EA_{RMS})$),
- zmiany nieliniowego modelu odnoszącego się do asymetrii/skośności rozkładu *beta* dla sygnału emisji akustycznej ($\hat{y}_{S_{k\beta}} = e^{S_{k\beta}(EA_{RMS})}$),
- oraz zmiany parametru energetycznego typu $E_{Sk\beta/RMS}$, reprezentującego utratę zdolności skrawnej CPS.

Ponadto, powyższy wybór uzupełniono o stan ściernicy (parametr y^*), który bezpośrednio stanowi o decyzji odnoszącej się do kontynuowania obróbki lub jej przerwania w celu wymiany ściernicy lub przywróceniu jej pierwotnej zdolności skrawnej poprzez zabieg obciągania.

W zależności od danego parametru (etykiety warunkowej) określono zbiór wartości lingwistycznych: bardzo mały (BM), mały (M), średni (S), duży (D) oraz bardzo duży (BD). W zaproponowanych systemie GWC-FIS wnioskowania rozmytego, wykorzystano dwie podstawowe funkcje przynależności: trójkątną oraz trapezową (tab. 5.1.1, D282).

funkcja przy- należności	zakres wartości	reprezentacja graficzna
trójkątna (<i>triangular</i>)	$\mu_r(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & \text{dla} & a \le x \le b \\ 0 & \text{dla} & x < a, x > c \\ \frac{x-c}{b-c} & \text{dla} & b < x \le c \end{cases}$	$\mu_{\mu}(x) = \begin{bmatrix} F \\ 0,5 \\ 0 \\ 150 \\ a \\ 160 \\ b \\ 170 \\ 180 \\ c \\ 190 \\ x \end{bmatrix}$
trapezowa (trapezoidal)	$\mu_r(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & \text{dla} a \le x \le b \\ \frac{x-c}{b-c} & \text{dla} c < x \le d \\ 1 & \text{dla} b < x \le c \end{cases}$	μ _μ (x) A 1 0,5
	$\begin{bmatrix} 0 & \text{dla} & x < a, x > a \end{bmatrix}$	0 0 150 a 160 b 170 c d 190 x

Tab. 5.1.1. Funkcje przynależności wraz z przedziałami wartości wykorzystane w zaproponowanym systemie wnioskowania rozmytego GWC-FIS

 Tab. 5.1.2.
 Przyjęte wartości graniczne funkcji przynależności dla zmiennych czynników wejściowych i wybranych czynników wyjściowych procesu szlifowania



Uwaga! Wyróżnione zakresy wartości wyznaczono na podstawie wcześniej określonych granicznych funkcji danego parametru. (verte *)

Tab. 5.1.2. (ciąg dalszy)



W oparciu o analizę wyników badań, a w szczególności wartości zrejestrowanych czynników wyjściowych procesu szlifowania, dla poszczególnych atrybutów warunkowych przyjęto powyżej przedstawione wartości graniczne dla wybranych funkcji przynależności pojęć rozmytych (tab. 5.1.2, D283).

Z kolei na podstawie zebranych danych i klasyfikacji podanej przez szlifierza, ustalono zbiór reguł rozmytych, które zamieszczono w tab. 5.1.3 (D285) oraz tab. 5.1.4 (D285). Tablica ta nie zawiera reguł, które były by między sobą sprzeczne. Za atrybut decyzyjny (wyjście z systemu logiki rozmytej), także przyjęto wielkość nieostrą, przyjmującą wartości: BM – bardzo małe zużycie (ściernica bardzo ostra), M – małe zużycie (ściernica ostra), S – średnie zużycie (ściernica średnio ostra/stępiona), D – duże zużycie (ściernica mało ostra), BD – bardzo duże zużycie (ściernica całkowicie stępiona).

Wartości graniczne funkcji przynależności dla atrybutu decyzyjnego (oceny stopnia zużycia¹⁵ ściernicy) ustalono w skali 10 stopniowej liczb rzeczywistych (y* $\in [0, 10]_{\mathbb{R}}$), co przedstawia rys. 5.1.1 (D284). Obszar zakreskowany, to zakres bardzo dużego zużycia, który wyznacza okres trwałości ściernicy.



Rys. 5.1.1. Przyjęte wartości graniczne funkcji przynależności dla zmiennej wyjściowej (stopień zużycia ściernicy) systemu wnioskowania rozmytego

W trakcie ustalania zbioru reguł dla systemu wnioskowania rozmytego ustalono, że reguły podzielone zostaną na 3 główne grupy wynikające z aktualnego obciążenia ściernicy w strefie szlifowania. Wynikało to z faktu, że wyniki badań wykazały różne zakresy wartości przyjmowanych przez czynniki wyjściowe procesu szlifowania w zależności od dobranej wydajności objętościowej szlifowania, która w przypadku przeprowadzonych eksperymentów, zależała od wartości posuwu stycznego stołu szlifierki v_{ft} (pozostałe wielkości mające wpływ na wydajność były niezmienne).

¹⁵ Zamiast tradycyjnego oznaczenia zużycia ściernicy (Q_s), które wyrażone jest w jednostce objętości materiału ściernicy utraconego w określonej chwili (jednostce czasu), tu stosuje się oznaczenie y^* , w celu wyróżnienia, że jest to oszacowane zużycie ściernicy w skali 0 – 10.

				Wa						
	zmie wejśc	enna iowa	v_{ft}	$K(EA_{RMS})$	$K_{\beta}(EA_{RMS})$	$S_{k\beta}(EA_{RMS})$	$e^{S_{k\beta}}$	E _{Skβ/RMS}		stan ściernicy (y*)
	nr wejścia		1.	2.	3.	4.	5.	6.		
	1.		М	BD	BM	BD	BD	BD		BM
	2.		М	D	BM	D	D	D		М
	3.		М	S	М	D	S	S		S
	4.		М	М	S	S	М	М		D
	5.		M S S	BM	S	М	BM	BM		BD
	6.			D	BM	BD	D	D		BM
ły	7.			D	М	D	D	S	to	М
regu	8.	jeżeli	S	S	S	D	S	М		S
nr	9.		S	М	S	S	М	М		D
	10.		S	BM	D	М	BM	BM		BD
	11.		D	D	BM	BD	S	S		BM
	12.		D	S	М	D	S	М		М
	13.		D	S	S	S	М	М		S
	14.		D	М	D	М	М	М		D
	15.		D	BM	BD	BM	BM	BM		BD

Tab. 5.1.3. Baza reguł głównych o strukturze 6-15-1 systemu wnioskowania rozmytego GWC-FIS wykorzystywana do oceny zużycia ściernicy

Ponadto, zbiór reguł w tablicy decyzyjnej systemu oceny zużycia ściernicy z atrybutami rozmytymi, podzielono na reguły główne o strukturze 6-15-1 oraz uzupełniające o strukturze 6-13-1 (kolejne cyfry oznaczają: ilość wejść, ilość reguł oraz ilość wyjść systemu wnioskowania rozmytego). Ilość reguł zoptymalizowano w oparciu szczegółową o analizę zmian poszczególnych wielkości procesu szlifowania w funkcji czasu pracy ściernic oraz relacji zachodzących pomiędzy nimi.

				Wa							
zmienna wejściowa		nna iowa	v_{ft}	$K(EA_{RMS})$	$K_{\beta}(EA_{RMS})$	$S_{k\beta}(EA_{RMS})$	$e^{S_{k\beta}}$	$E_{Sk\beta/RMS}$		stan ściernicy (y*)	
nr wejścia		1.	2.	3.	4.	5.	6.				
	16.	М	М	BM	D	М	BM	BM		BD	
	17.		М	BM	BD	М	BM	BM		BD	
	18.		М	BM	S	BM	BM	BM			BD
	19.		S BD S D	BM	BD	D	D		BM		
	20.			D	BM	BD	BD	D	to	BM	
ły	21.	jeżeli S	S	D	BM	BD	D	BD		BM	
regu	22.		S	BM	BD	М	BM	BM		BD	
nr	23.		S	BM	D	BM	BM	BM		BD	
	24.		D	BD	BM	BD	S	S		BM	
	25.		D	D	BM	BD	D	S		BM	
	26.		D	D	BM	BD	BD	S		BM	
	27.		D	D	BM	BD	S	D		BM	
	28.		D	D	BM	BD	S	BD		BM	

Tab. 5.1.4. Baza reguł uzupełniających o strukturze 6-13-1 systemu wnioskowania rozmytego GWC-FIS

Uwaga! Kolorem czerwonym oznaczono wartości lingwistyczne, których zabrakło w bazie reguł głównych.

Wymienione struktury ustalono tak, że pierwsze 15 reguł w pełni pokrywały wyniki badań eksperymentalnych. Druga grupa, to przypadki, których dla danych warunków badań nie zarejestrowano, ale powinny być sformułowane ze względu na możliwość wystąpienia granicznych wartości niektórych z parametrów (określonych, jako: BM lub BD). System powinien być uzupełniony o te parametry, by być systemem pełnym.

Ustaloną liczbę reguł uznano za optymalną. Dalsze ich zwiększanie mogłoby doprowadzić do zmniejszenia stopnia prawidłowych odwzorowań, szczególnie przy zastosowaniu neuronowego systemu rozmytego, co udowodniono w pracy [Lez1998].

Systemy ekspertowe oparte na eksploracji danych z wykorzystaniem tablic decyzyjnych i zbiorów przybliżonych można scharakteryzować ilościowo za pomocą współczynnika dokładności aproksymacji (przybliżenia). Poniżej szczegółowo przedstawiono analizę opracowanej tablicy decyzyjnej. Została ona przeprowadzona za pomocą wyznaczenia uogólnionej jakości aproksymacji, która występuje w teorii zbiorów przybliżonych.

Zbiór danych przedstawiany w postaci tablicy decyzyjnej (*TD*), której kolumny są atrybutami (parametrami, cechami), wiersze odpowiadają zaś obiektom (sytuacjom, stanom), a na przecięciu wierszy i kolumn znajdują się wartości odpowiednich atrybutów dla poszczególnych obiektów, nazywamy systemem informacyjnym (*SI*):

$$SI = (U, A, V, f),$$
 (5.1.1)

gdzie: U – to zbiór obiektów (nr reguł), tzw. uniwersum, A – zbiór atrybutów (warunkowych i decyzyjnych), V – zbiory wartości atrybutów, np. $V_{K(EA_{RMS})} = \{BM, M, S, D, BD\}$, f – to funkcja informacji, taka, że $\bigvee_{x \in U, a \in A} f(x, a) \in V$, np.: $f(1, v_{ft}) = M$.

Ponadto, zbiór atrybutów warunkowych zdefiniowano, jako zbiór $a \in A$, a zbiór atrybutów decyzyjnych, jako $d \in A$. W opisywanym przypadku:

$$\begin{split} U &= \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, \\ &17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28\}, \\ A &= \{v_{ft}, K(EA_{RMS}), K_{\beta}(EA_{RMS}), S_{k\beta}(EA_{RMS}), e^{Sk\beta}, E_{Sk\beta/RMS}, y^*\}, \\ a &= \{v_{ft}, K(EA_{RMS}), K_{\beta}(EA_{RMS}), S_{k\beta}(EA_{RMS}), e^{Sk\beta}, E_{Sk\beta/RMS}\}, \\ d &= \{y^*\}. \end{split}$$

Aby dokonać oceny jakości aproksymacji dla zbioru:

1. Ustalono zbiór *B* atrybutów warunkowych, takich że $B \subseteq A$:

$$B = \{v_{ft}, K(EA_{RMS}), K_{\beta}(EA_{RMS}), S_{k\beta}(EA_{RMS}), e^{sk\beta}, E_{sk\beta/RMS}\}.$$

2. Przeanalizowano relację nierozróżnialności oraz wyznaczono klasy abstrakcji:

$$IND(B) = \left\{ (x, y) \in UxU : \bigvee_{a \in B} f(x, a) = F(y, a) \right\},$$
(5.1.2)

$$IND(B) = \{\{1,1\},\{2,2\},\{3,3\},\{4,4\},\{5,5\},\{6,6\},\{7,7\},\{8,8\},\{9,9\},\{10,10\} \\ \{11,11\},\{12,12\},\{13,13\},\{14,14\},\{15,15\},\{16,16\},\{17,17\}, \\ \{18,18\},\{19,19\},\{20,20\},\{21,21\},\{22,22\},\{23,23\},\{24,24\}, \\ \{25,25\},\{26,26\},\{27,27\},\{28,28\}\}, \\ U / IND(B) = \{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,$$

17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28}.

Stąd w dalszej kolejności wyznaczono klasy abstrakcji, zawierające poszczególne obiekty systemu informacyjnego *SI*:

$$I_{SI,B}(x) = \{y \in U \mid (x, y) \in IND(B)\},$$
(5.1.3)

$$I_{SI,B}(1) = \{1\}, I_{SI,B}(2) = \{2\}, I_{SI,B}(3) = \{3\}, I_{SI,B}(4) = \{4\},$$
(5.1.3)

$$I_{SI,B}(5) = \{5\}, I_{SI,B}(6) = \{6\}, I_{SI,B}(7) = \{7\}, I_{SI,B}(8) = \{8\},$$
(7)

$$I_{SI,B}(9) = \{9\}, I_{SI,B}(10) = \{10\}, I_{SI,B}(11) = \{11\}, I_{SI,B}(12) = \{12\},$$
(7)

$$I_{SI,B}(13) = \{13\}, I_{SI,B}(14) = \{14\}, I_{SI,B}(15) = \{15\}, I_{SI,B}(16) = \{16\},$$
(7)

$$I_{SI,B}(17) = \{17\}, I_{SI,B}(18) = \{18\}, I_{SI,B}(19) = \{19\}, I_{SI,B}(20) = \{20\},$$
(7)

$$I_{SI,B}(21) = \{21\}, I_{SI,B}(22) = \{22\}, I_{SI,B}(23) = \{23\}, I_{SI,B}(24) = \{24\},$$
(7)

$$I_{SI,B}(25) = \{25\}, I_{SI,B}(26) = \{26\}, I_{SI,B}(27) = \{27\}, I_{SI,B}(28) = \{28\}.$$

3. Przydzielono reguły do odpowiednich zbiorów wynikowych X, takich że $X \subseteq U$:

$$\begin{split} X_{BM} &= \{1, 6, 11, 19, 20, 21, 24, 25, 26, 27, 28\}, \\ X_{M} &= \{2, 7, 12\}, \\ X_{S} &= \{3, 8, 13\}, \\ X_{D} &= \{4, 9, 14\}, \\ X_{BD} &= \{5, 10, 15, 16, 17, 18, 22, 23\}. \end{split}$$

4. Dokonano aproksymacji zbiorów:

Ponieważ system SI jest systemem informacyjnym, takim że $B \subseteq A$ oraz $X \subseteq U$, to:

– przybliżeniem dolnym zbioru *X* określono zbiór:

$$\underline{B}X = \{x \in U : I_{SI,B}(x) \subseteq X\},$$

$$\underline{B}X_{BM} = \{1, 6, 11, 19, 20, 21, 24, 25, 26, 27, 28\},$$

$$\underline{B}X_{M} = \{2, 7, 12\},$$

$$\underline{B}X_{S} = \{3, 8, 13\},$$

$$\underline{B}X_{D} = \{4, 9, 14\},$$

$$\underline{B}X_{BD} = \{5, 10, 15, 16, 17, 18, 22, 23\},$$
(5.1.4)

przybliżeniem górnym zbioru X, zbiór: _

—

—

$$\overline{B}X = \{x \in U : I_{SL,B}(x) \cap X \subseteq X\},$$
(5.1.5)

$$\overline{B}X_{BM} = \{1, 6, 11, 19, 20, 21, 24, 25, 26, 27, 28\},$$

$$\overline{B}X_M = \{2, 7, 12\},$$

$$\overline{B}X_S = \{3, 8, 13\},$$

$$\overline{B}X_D = \{4, 9, 14\},$$

$$\overline{B}X_{BD} = \{4, 9, 14\},$$

$$\overline{B}X_{BD} = \{5, 10, 15, 16, 17, 18, 22, 23\},$$
(5.1.6)

$$POS_B(X) = \overline{B}X,$$
(5.1.6)

$$POS_B(X_{BM}) = \{1, 6, 11, 19, 20, 21, 24, 25, 26, 27, 28\},$$

$$POS_B(X_M) = \{2, 7, 12\},$$

$$POS_B(X_M) = \{2, 7, 12\},$$

$$POS_B(X_M) = \{3, 8, 13\},$$

$$POS_B(X_M) = \{4, 9, 14\},$$

$$POS_B(X_{BD}) = \{5, 10, 15, 16, 17, 18, 22, 23\},$$
(5.1.7)

$$BN_B(X) = \overline{B}X - \underline{B}X,$$

$$(5.1.7),$$

$$BN_B(X) = \overline{B}X - \underline{B}X,$$

$$BN_B(X_M) = \emptyset,$$

$$BN_B(X_{BD}) = \emptyset,$$

$$POS_B(X_{BD}) = \{2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 22, 23\},$$

$$POS_B(X_{BD}) = \{1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 22, 23\},$$

$$POS_B(X_{BD}) = \{2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 22, 23\},$$

$$POS_B(X_{BD}) = \{1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 22, 23\},$$

$$POS_B(X_{BD}) = \{1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 22, 23\},$$

$$POS_B(X_{BD}) = \{1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 22, 23\},$$

$$POS_B(X_{BD}) = \{1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 22, 23\},$$

$$POS_B(X_{BD}) = \{1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 22, 23\},$$

$$POS_B(X_{BD}) = \{1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18$$

¹⁶ Elementy uniwersum U, które na pewno są identyfikowane, jako elementy zbioru X.
¹⁷ Elementy uniwersum U, które mogą należeć do zbioru X.
¹⁸ Elementy uniwersum U, które z pewnością nie mogą być identyfikowane, jako elementy zbioru X.
$$\begin{split} NEG_B(X_S) &= \{1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, \\ &\quad 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28\}, \\ NEG_B(X_D) &= \{1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, \\ &\quad 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28\}, \\ NEG_B(X_{BD}) &= \{1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 19, 20, 21, 24, 25, 26, 27, 28\}, \end{split}$$

Ponieważ w każdym przypadku zaszła zależność $\underline{B}X = \overline{B}X \Leftrightarrow BN_B(X) = \emptyset$, to wszystkie zbiory X w rozpatrywanym systemie nazywamy zbiorami dokładnymi.

5. Liczbowo scharakteryzowano aproksymację zbiorów poprzez wyznaczenie współczynnika dokładności aproksymacji zbioru X w systemie SI względem rozpatrywanego zbioru atrybutów B:

$$\alpha_{B}(X) = \frac{card(POS_{B}(X))}{card(\overline{B}X)},$$
(5.1.9)

gdzie: α_B – to współczynnik dokładności aproksymacji zbioru, przyjmuje wartości $0 \le \alpha_B \le 1$, *cord(x)* – oznacza liczność zbioru *x*.

$$\alpha_B(X_{BM}) = \frac{11}{11} = 1, \ \alpha_B(X_M) = \frac{3}{3} = 1, \ \alpha_B(X_S) = \frac{3}{3} = 1,$$

$$\alpha_B(X_D) = \frac{3}{3} = 1, \ \alpha_B(X_{BD}) = \frac{8}{8} = 1.$$

Uzyskano identyczne wyniki $\alpha_B(X) = 1$, co potwierdza powyższe stwierdzenie, że wszystkie zbiory X są zbiorami dokładnymi.

6. Określono rodzinę zbiorów i dokonano ich aproksymacji:

$$F = \{X_{BM}, X_M, X_S, X_D, X_{BD}\},$$
(5.1.10)

$$\underline{B}F = \{\underline{B}X_{BM}, \underline{B}X_{M}, \underline{B}X_{S}, \underline{B}X_{D}, \underline{B}X_{n}\}, \qquad (5.1.11)$$

$$\overline{B}F = \{\overline{B}X_{BM}, \overline{B}X_{M}, \overline{B}X_{S}, \overline{B}X_{D}, \overline{B}X_{n}\}, \qquad (5.1.12)$$

$$POS_{B}(F) = \bigcup_{X_{i} \in F} POS_{B}(X_{i}) = \bigcup_{X_{i} \in F} \underline{B}X(X_{i}), \qquad (5.1.13)$$

$$BN_B(F) = \bigcup_{X_i \in F} BN_B(X_i) = \bigcup_{X_i \in F} \left(\overline{B}X(X_i) - \underline{B}X(X_i) \right),$$
(5.1.14)

$$NEG_B(F) = \bigcup_{X_i \in F} NEG_B(X_i) = U - \bigcup_{X_i \in F} \overline{B}X(X_i).$$
(5.1.15)

Po obliczeniu powyższych parametrów, otrzymano:

 $\underline{BF} = \{\{1, 6, 11, 19, 20, 21, 24, 25, 26, 27, 28\}, \{2, 7, 12\}, \\ \{3, 8, 13\}, \{4, 9, 14\}, \{5, 10, 15, 16, 17, 18, 22, 23\}\}, \\ \overline{BF} = \{\{1, 6, 11, 19, 20, 21, 24, 25, 26, 27, 28\}, \{2, 7, 12\}, \\ \{3, 8, 13\}, \{4, 9, 14\}, \{5, 10, 15, 16, 17, 18, 22, 23\}\},$

$$POS_{B}(F) = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28\},\$$

 $BN_{B}(F) = \emptyset$ oraz $NEG_{B}(F) = \emptyset$.

7. Liczbowo scharakteryzowano aproksymację rodziny zbiorów:

Ponieważ jakość aproksymacji rodziny F zbiorów w systemie informacyjnym SI względem zbioru atrybutów B wyraża się wzorem:

$$\gamma_B(F) = \frac{card(POS_B(F))}{card(U)},$$
(5.1.16)

natomiast dokładność aproksymacji rodziny F w systemie SI względem zbioru atrybutów B:

$$\alpha_{B}(F) = \frac{card(POS_{B}(F))}{\sum_{X_{i} \in F} card(\overline{B}X_{i})},$$
(5.1.17)

to powyższe współczynniki w opisywanym systemie SI przyjęły wartości:

$$\gamma_B(F) = \frac{28}{28} = 1, \ \alpha_B(F) = \frac{28}{28} = 1.$$

Wszystkie elementy rodziny *F* są zbiorami dokładnymi, co wyrażone jest spełnieniem równości: $\gamma_B(F) = \alpha_B(F) = 1$.

8. Zdefiniowano jądro systemu SI:

Dla danego systemu informacyjnego *SI* oraz zbioru atrybutów $B \subseteq A$, wszystkie niezbędne atrybuty *B* (dla zachowania rozróżnialności obiektów w systemie) nazywamy jądrem (rdzeniem) i oznaczamy przez *CORE(B)*. Oceniając atrybuty dla $B \subseteq A$ i $a \in B$, mówimy, że atrybut *a* jest zbędny w *B*, gdy: $IND(B) = IND(B - \{a\})$, w przeciwnym przypadku atrybut *a* jest niezbędny w *B*. Ponadto, zbiór atrybutów *B* jest niezależny, gdy dla każdego $a \in B$ atrybut *a* jest niezbędny. W przeciwnym przypadku zbiór jest zależny.

$$U / IND(B) = \{\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \{10\}, \{11\}, \{12\}, \\ \{13\}, \{14\}, \{15\}, \{16\}, \{17\}, \{18\}, \{19\}, \{20\}, \{21\}, \{22\}, \\ \{23\}, \{24\}, \{25\}, \{26\}, \{27\}, \{28\}\}, \\ U / IND(B - \{v_{fi}\}) = \{\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4,9\}, \{5\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{10,16\}, \{11\}, \{12\}, \\ \{13\}, \{14\}, \{15\}, \{17,22\}, \{18\}, \{19\}, \{20\}, \{21\}, \\ \{23\}, \{24\}, \{25\}, \{26\}, \{27\}, \{28\}\}, \\ U / IND(B - \{K(EA_{RMS})\}) = \{\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \{6,19\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \{10\}, \\ \{11,24\}, \{12\}, \{13\}, \{14\}, \{15\}, \{16\}, \{17\}, \{18\}, \\ \{20\}, \{21\}, \{22\}, \{23\}, \{24\}, \{25\}, \{26\}, \{27\}, \{28\}\}, \\ U / IND(B - \{K_{\beta}(EA_{RMS})\}) = \{\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5,16,17\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \\ \{10,22\}, \{11\}, \{12\}, \{13\}, \{14\}, \{15\}, \{18\}, \{19\}, \\ \{20\}, \{21\}, \{23\}, \{24\}, \{25\}, \{26\}, \{27\}, \{28\}\}, \\ \end{bmatrix}$$

$$\begin{split} U \ / \ IND(B - \{S_{k\beta}(EA_{RMS})\}) &= \{\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5,18\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \{10,23\}, \\ &\{11\}, \{12\}, \{13\}, \{14\}, \{15\}, \{16\}, \{17\}, \{19\}, \\ &\{20\}, \{21\}, \{22\}, \{24\}, \{25\}, \{26\}, \{27\}, \{28\}\}, \\ U \ / \ IND(B - \{e^{Sk\beta}\})\}) &= \{\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \{6,20\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \{10\}, \\ &\{11, 25, 26\}, \{12\}, \{13\}, \{14\}, \{15\}, \{16\}, \{17\}, \{18\}, \\ &\{19\}, \{21\}, \{22\}, \{23\}, \{24\}, \{27\}, \{28\}\}, \\ U \ / \ IND(B - \{E_{SK\beta/RMS})\}) &= \{\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \{6,21\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \{10\}, \\ &\{11, 27, 28\}, \{12\}, \{13\}, \{14\}, \{15\}, \{16\}, \{17\}, \{18\}, \\ &\{19\}, \{20\}, \{22\}, \{23\}, \{24\}, \{25\}, \{26\}\}. \end{split}$$

Powyżej zaprezentowane wyniki wykazują, że:

- $U / IND(B \{v_{ft}\}) \neq U / IND(B)$, co oznacza, że atrybut warunkowy v_{ft} jest niezbędny,
- $U / IND(B \{K(EA_{RMS})\}) \neq U / IND(B)$, co oznacza, że atrybut warunkowy $K(EA_{RMS})$ jest niezbędny,
- $U / IND(B \{K_{\beta}(EA_{RMS})\}) \neq U / IND(B)$, co oznacza, że atrybut warunkowy $K_{\beta}(EA_{RMS})$ jest niezbędny,
- $U / IND(B \{S_{k\beta}(EA_{RMS})\}) \neq U / IND(B)$, co oznacza, że atrybut warunkowy $S_{k\beta}(EA_{RMS})$ jest niezbędny,
- $U / IND(B \{e^{Sk\beta}\}) \neq U / IND(B)$, co oznacza, że atrybut warunkowy $e^{Sk\beta}$ jest niezbędny,
- $U / IND(B \{E_{Sk\beta/RMS}\}) \neq U / IND(B)$, co oznacza, że atrybut warunkowy $E_{Sk\beta/RMS}$ jest niezbędny.

Ostatecznie, przeprowadzone badania analityczne wykazały, że każdy z rozpatrywanych atrybutów warunkowych jest istotny i wchodzi w skład jądra systemu informacyjnego *SI*. Tym samym, dla opisywanego systemu informacyjnego *SI*, zbiorem wszystkich niezbędnych atrybutów *B* jest:

$$CORE(B) = \{v_{ft}, K(EA_{RMS}), K_{\beta}(EA_{RMS}), S_{k\beta}(EA_{RMS}), e^{Sk\beta}, E_{Sk\beta/RMS}\}.$$

9. Porównanie udziału atrybutów warunkowych systemu SI:

Ponieważ tablica decyzyjna *TD* pozbawiona była reguł sprzecznych (te same wartości atrybutów wskazują różne decyzje), jakość jej aproksymacji wyniosła 1,0.

W celu precyzyjnego i konkretnego opisana relacji pomiędzy obiektami występującymi w bazie wiedzy, stosuje się redukcję liczby atrybutów opisujących owe relacje. Poszukuje się takich podzbiorów atrybutów, które zachowują podział obiektów na klasy decyzyjne taki sam, jak wszystkie atrybuty. W tabeli 5.1.5 (D291) zamieszczono wyniki analiz tablic decyzyjnych w zależności od udziału atrybutów rozmytych. W celu zwiększenia czytelności, przyjęto oznaczenia cyfrowe, które odpowiadają tym zamieszczonym w tablicy 5.1.3 (D285).

Tab. 5.1.5. Porównanie jakości oraz dokładności aproksymacji w systemie informacyjnym w zależności od udziału atrybutów warunkowych

l.p.	lista usuniętych atrybutów z rodziny F	jakość aproksymacji γ _B (F)	dokładność aproksymacji α _B (F)
1.	-	1,0	1,0
2.	1	1,0	1,0

(verte ♦)

Tab. 5.1.5. (ciąg dalszy)

2	2	1.0	1.0
5.	2	1,0	1,0
4.	3	1,0	1,0
5.	4	1,0	1,0
6.	5	1.0	1.0
7	6	1.0	1.0
7.	0	1,0	1,0
8.	1,2	0,892857	0,806452
9.	1, 3	0,928571	0,866667
10.	1,4	0,928571	0,866667
11	1 5	1.0	1.0
12	1,5	0.029571	0.9(((7
12.	1, 0	0,928571	0,800007
13.	2, 3	1,0	1,0
14.	2,4	1,0	1,0
15.	2.5	1.0	1.0
16	2.6	1.0	1.0
10.	2,0	1,0	1,0
17.	3,4	1,0	1,0
18.	3, 5	1,0	1,0
19.	3,6	1,0	1,0
20	4 5	1.0	1.0
20.	1,5	1,0	1,0
21.	4,0	1,0	1,0
22.	5, 6	1,0	1,0
23.	1, 2, 3	0,821429	0,69697
24.	1, 2, 4	0.785714	0.647059
25	1 2 5	0.821429	0 69697
25.	1 7 6	0.021727	0,60607
20.	1, 2, 0	0,821429	0,09097
27.	1, 3, 4	0,785714	0,64/059
28.	1, 3, 5	0,928571	0,866667
29.	1, 3, 6	0,892857	0,806452
30.	1.4.5	0.857143	0.75
31	1 4 6	0.785714	0.647059
22	1, 7, 0	0,029571	0,047055
32.	1, 5, 6	0,928371	0,800007
33.	2, 3, 4	0,928571	0,866667
34.	2, 3, 5	1,0	1,0
35.	2, 3, 6	1,0	1,0
36.	2, 4, 5	0,928571	0,866667
37	246	1.0	1.0
28	2, 1, 0	1,0	1,0
20	2, 5, 0	1,0	1,0
39.	3, 4, 5	0,928571	0,866667
40.	3, 4, 6	0,892857	0,806452
41.	3, 5, 6	1,0	1,0
42.	4, 5, 6	1.0	1.0
13	1 2 3 4	0.5	0 232323
43.	1, 2, 3, 4	0,5	0,333333
44.	1, 2, 3, 5	0,/5	0,0
45.	1, 2, 3, 6	0,785714	0,647059
46.	1, 2, 4, 5	0,607143	0,435897
47.	1, 2, 4, 6	0,642857	0,473684
48	1.2.5.6	0.678571	0.513514
10	1345	0.607143	0.435807
+9.	1, 3, 4, 3	0,007143	0,43307/
50.	1, 3, 4, 6	0,/14286	0,555556
51.	1, 4, 5, 6	0,607143	0,435897
52.	1, 3, 5, 6	0,892857	0,806452
53.	2, 3, 4, 5	0,821429	0,638889
54	2346	0.607143	0.435897
55	2, 3, 7, 0	0.057142	0.75
33.	2, 3, 3, 0	0,03/143	0,75
56.	2, 4, 5, 6	0,75	0,6
57.	3, 4, 5, 6	0,785714	0,647059
58.	1, 2, 3, 4, 5	0,392857	0,192982
59	1.2.346	0.392857	0.211538
60	1 2 3 5 6	0.5	0 333333
61	1, 2, 3, 3, 0	0.107142	0,0500475
01.	1, 2, 4, 3, 0	0,10/143	0,03064/3
62.	1, 3, 4, 5, 6	0,5	0,333333
63.	2, 3, 4, 5, 6	0,0	0,0

Jak wynika z analizy wartości parametrów zamieszczonych w powyższej tabeli, zawierającej porównanie jakości oraz dokładności aproksymacji w systemie informacyjnym w zależności od udziału atrybutów warunkowych, z tablicy decyzyjnej (*TD*) można usunąć do trzech czynników wejściowych, przy jednoczesnym zachowaniu prawidłowości działania systemu. Jednakże redukcja ta nie może być dowolna, gdyż pomiędzy czynnikami występują ścisłe relacje.

Przy założeniu usunięcia z analizy maksymalnej ilości parametrów, najmniejszy wpływ na jakość aproksymacji miały czynniki $K(EA_{RMS})$ (wystąpiła 4-krotnie w różnych kombinacjach), $K_{\beta}(EA_{RMS})$ (3-krotnie), $S_{k\beta}(EA_{RMS})$ (2-krotnie), $e^{Sk\beta}$ (4-krotnie) oraz $E_{Sk\beta/RMS}$ (5-krotnie). Z powyższych wyników można wywnioskować, że właściwym będzie usunięcie grupy składającej się z: $K(EA_{RMS})$, $e^{Sk\beta}$ oraz $E_{Sk\beta/RMS}$ (wiersz 38. w tab. 5.1.5, \Box 291).

Definiując reduktor *RED(B)*, jako najmniejszy zbiór atrybutów, przy którym zostaje zachowana dotychczasowa klasyfikacja (rozróżnialność) obiektów, na podstawie powyższych wyników można stwierdzić, że:

$$RED(B) = \{v_{ft}, K_{\beta}(EA_{RMS}), S_{k\beta}(EA_{RMS})\}$$

Oznacza to, że w opracowanym systemie wnioskowania rozmytego FIS, dominujące znaczenie w ocenie stopnia zużycia ściernicy miały:

- wartość prędkości posuwu stycznego stołu szlifierki v_{ft}, czyli aktualne obciążenie ściernicy w strefie szlifowania,
- oraz dwie pochodne emisji akustycznej w postaci parametru kurtoza oraz skośności rozkładu *beta* dla wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej.

Jednakże, w celach poznawczych oraz dla odzwierciedlenia pełnej analizy czynników wyjściowych procesu szlifowania, dalszą część pracy opracowano z pominięciem redukcji listy atrybutów warunkowych.



Rys. 5.1.2. Schemat blokowy systemu wnioskowania rozmytego zrealizowanego w programie MATLAB

Na podstawie opracowanych reguł i wybranych wartości granicznych funkcji przynależności dla zmiennych czynników wejściowych oraz ustalonej grupy czynników wyjściowych procesu szlifowania, w oparciu o funkcje wbudowane w środowisku MATLAB¹⁹ 6.0, amerykańskiej firmy *The MathWorks, Inc.*, zbudowano system wnioskowania rozmytego. Schemat tego systemu przedstawiono na rysunku 5.1.2 (D293).

Opracowany system FIS jest typu *Mamdani*, co oznacza, że wyniki rozmyte kolejnych reguł łączone są poprzez operator agregacji (skupiania), a ostateczny wynik podlega defuzyfikacji, a na wyjściu systemu znajduje się konkretna wartość.

Jako operator agregacji przyjęto funkcję sumującą. Ponadto, określając relacje rozmyte (reguły) skorzystano tylko z jednego operatora przekształceń (implikacji): AND zdefiniowanego następująco [Kac1996]:

$$\mu_{AND}(x, y) = \gamma \min(x, y) + (1 - \gamma)(x + y)/2, \qquad (5.1.18)$$

gdzie: γ – parametr przypisujący wagę jaką przypisuje się relacji.

Dla $\gamma = 1$, co założono w trakcie realizacji projektowania opisywanego systemu FIS, operator relacji rozmytej AND staje się operatorem MIN:

$$\mu_{AND}(x, y) = \min(x, y). \tag{5.1.19}$$

Ponadto, proces defuzyfikacji wynikowej funkcji przynależności (μ_{wyn}), czyli zamiany na konkretną wartość liczbową, w zaproponowanym układzie diagnostyki rozmytej oparto na metodzie środka ciężkości (rys. 5.1.3, \Box 294).



Rys. 5.1.3. Graficzna interpretacja defuzyfikacji metodą środka ciężkości

$$y^{*} = \frac{\int y \cdot \mu_{wyn.}(y) \, dy}{\int \mu_{wyn.}(y) \, dy},$$
(5.1.20)

gdzie: y^* – wartość ostra wyjścia,

 $\mu_{wyn.(y)}$ – wynikowa funkcja przynależności,

y – wartość zmiennej wyjściowej.

Metoda ta wymaga obliczenia dwóch całek (wzór 5.1.20, D294). Do jej cech należy zaliczyć uwzględnienie wszystkich zaktywowanych zbiorów rozmytych, dzięki czemu otrzymujemy płynne zmiany na wyjściu. Natomiast do wad zawężanie zakresu defuzyfikacji, co oznacza, że w przypadku aktywacji któregoś z brzegowych zbiorów rozmytych nie otrzymuje się wartości maksymalnej (lub minimalnej) danego zakresu (można temu zaradzić zwiększając przedział brzegowych zbiorów rozmytych zmiennej wyjściowej).

¹⁹ MATLAB - program komputerowy będący interaktywnym środowiskiem do wykonywania obliczeń naukowych i inżynierskich, oraz do tworzenia symulacji komputerowych. Nazwa programu pochodzi od angielskich słów *MATrix LABoratory*, gdyż początkowo program ten był przeznaczony do numerycznych obliczeń macierzowych.



Rys. 5.1.4. Przykładowy schemat wnioskowania typu *Mamdani* z zastosowaniem operatora implikacji MIN

Ustalona baza reguł utworzyła szereg zależności występujących pomiędzy zużyciem ściernicy, a wejściowymi czynnikami systemu wnioskowania rozmytego. Relacje te zaprezentowano w formie wykresów powierzchniowych na rysunku 5.1.5 (D295).



Rys. 5.1.5. Kaskada wykresów powierzchniowych reprezentujących otrzymane zależności zużycia ściernicy w funkcji wejściowych czynników systemu wnioskowania rozmytego (verte *)



Rys. 5.1.5. (ciąg dalszy)

Zaprojektowany system wnioskowania rozmytego FIS pozwolił na opracowanie w pełni funkcjonalnego układu, którego zadaniem w proponowanym systemie nadzoru przebiegu procesu szlifowania GWC-FIS jest ocena aktualnego stanu CPS. Układ ten składa się z:

- modułu wejścia sygnałów ze strefy szlifowania,
- zbioru wyświetlaczy, które wskazują aktualną wartość każdego z analizowanych parametrów sygnału emisji akustycznej,
- części zasadniczej w postaci opracowanego systemu FIS, który wnioskuje o stanie ściernicy na podstawie napływających do niego danych,
- oraz modułu wyjściowego, w którym umieszczono sygnalizatory przekroczenia kolejnych granic zużycia ściernicy, wyświetlacza z oszacowaną wartością zużycia ściernicy (w skali

0-10) oraz oscyloskopu, na którym rejestrowane są wartości w funkcji czasu pracy narzędzia (rys. 5.1.6, \Box 297).



Rys. 5.1.6. Moduł służący do oceny zużycia ściernicy w hybrydowym systemie sterowania (GWC-FIS) posuwem wzdłużnym szlifierki

W celu zbadania poprawności działania opracowanego układu, na jego wejścia podano rzeczywiste sygnały zarejestrowane w trakcie badań eksperymentalnych. Aby zaobserwować rosnące zużycie narzędzia, parametry emisji akustycznej wprowadzono, tak jak je zebrano, czyli w funkcji czasu pracy ściernicy.



Rys. 5.1.7. Przyjęte wartości graniczne funkcji przynależności dla geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej czynnej powierzchni ściernicy *K*_{CPS}

Ponadto, przyjęto odpowiednie wartości graniczne funkcji przynależności dla geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej czynnej powierzchni ściernicy K_{CPS} (rys. 5.1.7, D297), co pozwoliło zaobserwować istotne różnice w ocenie bezpośredniej CPS (poprzez pomiary jej topografii) i pośredniej (analiza parametrów EA). Dla otrzymanych wartości oszacowanego stopnia zużycia ściernicy, także przypisano odpowiednie grupy lingwistyczne.

Wszystkie wyniki, wraz wykresami wskaźnika zdolności skrawnej ściernicy i oszacowanego wskaźnika starcia zamieszczono w tablicach 5.1.6 - 5.1.8 ($\Box 298 - 300$). Analiza otrzymanych rezultatów świadczy o efektywnym działaniu układu opartego na wnioskowaniu rozmytym. W funkcji czasu pracy ściernicy zaobserwować można bardzo wyraźny trend w zmianach wartości porównywanych parametrów (tab. 5.1.6, \B298).

Tab. 5.1.6.Reakcja układu wnioskowania rozmytego na rzeczywiste czynników wyjściowe procesu szlifowania
 zarejestrowane w trakcie szlifowania ściernicą 99A60J7V (powtórzenie 1)



W czasie, gdy geometryczny wskaźnik zdolności skrawnej (K_{CPS}) maleje, to zużycie ściernicy określone poprzez parametr y^* rośnie. Szczególną cechą opracowanego układu FIS, wynikającą z jego źródła (sygnał EA), jest jego reakcja na nagłe znaczące zmiany sygnałów. Dzięki temu w przypadku wystąpienia momentu samoostrzenia ściernicy, zdarzenie to można obserwować na wyjściu układu w postaci chwilowego spadku wartości y^* . Dla ściernicy o nominalnie mniejszej twardości (99A60J7V), która słabiej utrzymuje ziarna w swojej strukturze, a tym samym ma tendencje do wykruszeń, szczególnie silne zmiany tego typu występują wyłącznie na początku okresu trwałości ściernicy. Po względnie szybkim wykruszeniu ziaren, ściernica ulega zalepieniu, czego konsekwencją jest prawie jednostajna utrata zdolności skrawnej do końca okresu trwałości ściernicy.



Tab. 5.1.7. Reakcja układu wnioskowania rozmytego na rzeczywiste czynników wyjściowe procesu szlifowania zarejestrowane w trakcie szlifowania ściernicą 99A60J7V (powtórzenie 2)

Odmienna sytuacja ma miejsce w przypadku szlifowania ściernicą o nominalnie większej twardości (99A60M7V). W tym przypadku ziarna są utrzymywane silniej przez mostki spoiwa, przez co w początkowym okresie rejestrowany jest głównie spadek zdolności skrawnej (z objawami postępującego zużycia) narzędzia. Jednakże po przekroczeniu określonej granicy wytrzymałości spoiwa, pod wpływem działający sił ziarna ulegają wykruszeniu. Rejestrowana jest wtedy znaczna zmiana sygnału EA i w konsekwencji spadek szacowanej wartości zużycia *y**. Ponieważ jednak, jak wspomniano wcześniej, twardsza ściernica dłużej utrzymuje ziarna w swojej strukturze, to praktycznie do końca jej okresu trwałości można obserwować momenty samoostrzenia w postaci wahania wartości wyjściowej układu. Jednakże zmiany te nie wpływają globalnie na charakter trendu, przez co krzywa reprezentująca zużycie ściernicy, posiada tendencję rosnącą.



Tab. 5.1.8. Reakcja układu wnioskowania rozmytego na rzeczywiste czynników wyjściowe procesu szlifowania zarejestrowane w trakcie szlifowania ściernicą 99A60M7V (powtórzenie 1)

Analiza wyników działania zaproponowanego układu FIS, pozwala jednoznacznie stwierdzić, że wyznaczone reguły decyzyjne z atrybutami rozmytymi mogą być z powodzeniem stosowne do klasyfikacji stanu zużycia ściernicy, a zwłaszcza do wysłania (do systemu lub operatora) sygnału o całkowitej utracie zdolności skrawanej ściernicy i zakończenia okresu jej trwałości. Jeżeli w trakcie obróbki system będzie rejestrował czas pracy ściernicy, to opracowane narzędzie pozwoli, przy pomocy analizy sygnału EA, określić chwilową zdolność skrawną narzędzia (w skali 0 - 10) oraz dokładnie ocenić jego okres trwałości, czyli czas między dwoma kolejnymi obciągnięciami, w którym ściernica zachowuje zdolność skrawną.

5.2 Koncepcja realizacji sprzętowej opracowanego inteligentnego systemu nadzorowania GWC-FIS

Zrealizowane badania, dotyczące obróbki sygnałów rejestrowanych ze strefy szlifowania oraz sposobu ich wykorzystania do nadzoru procesu wytwarzania wykazały, że korzystne jest ich uśrednianie i wyznaczanie wartości skutecznej, szczególnie odnośnie sygnału emisji akustycznej. Układy diagnostyki narzędzia tworzone w laboratoriach badawczych są z reguły wieloczujnikowe, podczas gdy w układach przemysłowych dominuje tendencja: jeden proces/narzędzie – jeden czujnik.

Dlatego też, w ramach niniejszej pracy zdecydowano się zaproponować układ mogący w warunkach przemysłowych (z wykorzystaniem przemysłowych czujników) realizować zadania automatycznego sytemu diagnostyki ściernicy (ASDS). Opisany we wcześniejszej części pracy hybrydowy system sterowania (GWC-FIS) posuwem wzdłużnym szlifierki z uwzględnieniem chwilowej zdolności skrawnej ściernicy oraz wybranego kryterium jakościowego, wymaga zweryfikowania poprzez wykonanie i przebadanie prototypu.



Rys. 5.2.1. Schemat blokowy budowy inteligentnego systemu diagnostyki procesu szlifowania

Do budowy prototypu systemu nadzorowania procesu szlifowania płaszczyzn, przewidziano wykorzystanie uniwersalnej szlifierki do płaszczyzn typu OC3 (model 3711) ze zmodyfikowanym wrzecionem, co pozwoli na dowolny dobór prędkości obrotowej ściernicy za pomocą przemiennika częstotliwości SJ100 firmy *Hitachi, Ltd.* (model 030HFE). Dodatkowo stół obrabiarki wyposażyć należy w specjalny uchwyt przedmiotu obrabianego, który pozwoli zamocować czujnik EA, w jak najbliższym sąsiedztwie strefy szlifowania. Schemat blokowy układów przeznaczonych do realizacji sprzętowej systemu diagnostyki GWC-FIS przedstawiono na rys. 5.2.1 (D301). W proponowanym rozwiązaniu, na układ monitorowania procesu składają się: piezoelektryczny czujnik²⁰ EA typu 8152A2, wzmacniacz i konwerter typu 5125A. Wszystkie wymienione elementy produkuje firma *Kistler Instrument Corp.* Natomiast zespół sterowania posuwem składa się z serwozaworu proporcjonalnego oraz siłownika hydraulicznego.

Działanie układu pomiarowego i napędowego kontrolowane jest przez komputer IBM PC klasy Pentium wyposażony w odpowiednie karty pomiarowe i sterujące. Jako kartę pomiarową wykorzystać można kartę typu DAS-1601 firmy *Keithley Instruments, Inc.* z przetwornikiem analogowo-cyfrowym (A/C) pracującym z częstotliwością próbkowania 100 kHz. W przypadku akwizycji jedynie wartości skutecznej sygnału EA, większa częstotliwość próbkowania nie jest konieczna. Karta sterująca powinna natomiast być wyposażona w szybki procesor DSP, który zdolny będzie sterować stołem szlifierki w czasie rzeczywistym (bez istotnych opóźnień). Sam stół napędzany jest siłownikiem hydraulicznym sterowanym serwozaworem proporcjonalnym.

Ponadto, koncepcja realizacji sprzętowej inteligentnego systemu GWC-FIS, obejmuje szereg założeń, do których należą m.in.:

- System powinien być zbudowany z uniwersalnych kart do akwizycji danych (DAQ), co umożliwi zmniejszenie czasu wdrożenia nowych rozwiązań (lub modernizacji istniejących), zwiększenie uniwersalności i elastyczności, a w rezultacie obniżenie kosztów.
- Akwizycja danych i ich analiza, a następnie przeprowadzana diagnostyka i sterownie muszą być realizowane w czasie rzeczywistym (*on-line*), przy założeniu jak najmniejszych opóźnień w reakcji systemu na zdarzenia zachodzące w strefie szlifowania.
- Strategia diagnostyki i nadzorowania oparta powinna być tylko na pomiarze i analizie zaledwie kilku najistotniejszych parametrów sygnału emisji akustycznej.
- W warunkach przemysłowych (podobnie do prac laboratoryjnych) jednym z ważniejszych wyników pracy systemu będzie informacja o aktualnym (oszacowanym) stanie zużycia ściernicy. Dotychczas w warunkach przemysłowych było to trudne do zrealizowania.
- W trakcie uczenia układu operator będzie mógł sam ocenić moment stępienia ściernicy (jak i stany pośrednie) na podstawie niezależnie stosowanych kryteriów, a więc na przykład na podstawie pogorszenia jakości powierzchni, a następnie wprowadzić odpowiednie wartości graniczne zarówno dla sygnału EA, jak i wartości graniczne funkcji przynależności dla zmiennych czynników wejściowych i wybranych czynników wyjściowych procesu szlifowania wykorzystanych w module wnioskowania rozmytego.

5.3 Wnioski z wykorzystania sygnału EA w diagnostyce zużycia ściernicy

W wielu pracach poświęconych diagnostyce procesu szlifowania, np. [Lez1998, Rol1998], zwracano uwagę, że problemem ciągle nierozwiązanym jest znalezienie obiektywnych kryteriów oceny stępienia ściernicy, szczególnie takich, które byłyby skorelowane z jakością technologiczną przedmiotu. Wydaje się, że zaprezentowany w niniejszym rozdziale hybrydowy system GWC-FIS, a przede wszystkim ustalone w poprzednich rozdziałach cechy sygnału EA, stanowią przynajmniej częściowe rozwiązanie tego złożonego zagadnienia.

Przedstawiony powyżej system przeznaczony jest do diagnostyki i sterowania procesem szlifowania. Wykorzystuje on sygnał EA mierzony w trakcie procesu szlifowania, by na podstawie jego parametrów, dokonać oceny stanu zużycia ściernicy. W celu poprawnego

²⁰ Tradycyjny, stykowy, piezoelektryczny odbiornik fal emisji akustycznej można zastąpić bezstykowym czujnikiem typu SEH (*Schall-Emission-Hydrophon*), dla którego ośrodkiem przenoszenia fali dźwiękowej jest strumień płynu chłodząco-smarującego o średnicy 5 mm (10mm dla sensora *SEH-Maxi*) [Nor2006].

działania układu, zaimplementowano w nim dwie metody sztucznej inteligencji: teorię logiki rozmytej oraz sztuczne sieci neuronowe. Całość hybrydowego systemu sterowania posuwem wzdłużnym szlifierki (GWC-FIS) z uwzględnieniem chwilowej zdolności skrawnej ściernicy oraz wybranego kryterium jakościowego, stanowi koncepcję i przewiduje się, że może być z powodzeniem wykorzystana do budowy układów monitorowania i sterowania przebiegiem obróbki. Ponadto, zgodnie z aktualną tendencją, opracowany system pozwala na eliminację (lub znaczne ograniczenie) udziału człowieka w bezpośrednim nadzorowaniu procesu wytwa-rzania.

W ramach niniejszej pracy opracowano część omawianego systemu: jego centralną części analityczną, w której następuje akwizycja sygnałów ze strefy szlifowania oraz ich obróbka (filtrowanie i analiza statystyczna) oraz część odpowiedzialną za ocenę zużycia ściernicy w oparciu o wnioskowanie rozmyte. W szczególnym przypadku, zrealizowana część proponowanego systemu pozwala dokonać ilościowej oceny okresu trwałości ściernicy, co szczegółowo opisano w rozdziale 5.1.

Skonstruowany układ wnioskowania rozmytego został przebadany dla danych z procesu szlifowania, potwierdzając wysoką użyteczność logiki rozmytej w zakresie określania stanu zużycia narzędzia, co świadczy o jego predyspozycji do podejmowania decyzji w całym systemie.

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz, można stwierdzić, że zaproponowany przez autora hybrydowy system sterowania (GWC-FIS) posuwem wzdłużnym szlifierki z uwzględnieniem chwilowej zdolności skrawnej ściernicy oraz wybranego kryterium jakościowego, ze względu na swój uniwersalny charakter, może być wykorzystany w różnych warunkach przebiegu procesu szlifowania. Przewiduje się, że niezależnie od dobranej twardości ściernicy i materiału obrabianego, a także nastaw procesu (różne prędkości obrotowe ściernicy i posuwu, a także wartości dosuwu), system będzie spełniał swoje zadanie, a do poprawnej pracy wymagał będzie jedynie wcześniejszej kalibracji (ustalenia nowych wartości granicznych parametrów sygnału EA oraz funkcji przynależności). Zadanie to może być zrealizowane poprzez utworzenie bazy danych, z której system odczytywałby potrzebne informacje.

Konieczna jest jednak kontynuacja prac badawczych, przede wszystkim w celu opracowania dla określonych warunków szlifowania baz danych, przeznaczonych do nauki i testowania sztucznych sieci neuronowych. W szczególności zbiory te powinny zawierać relacje między rejestrowanymi sygnałami, a rezultatami obróbki (kryteria jakościowe) oraz ich relacje ze zmianą obciążenia ściernicy (Δv_{ft} – przy założeniu sterownia prędkością posuwu stycznego stołu szlifierki). Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych wydaje się być celowe, ze względu na ich zdolność aproksymacji funkcji, łatwość uczenia się klasyfikacji oraz skuteczność w wykrywaniu ukrytych zależności.

6. podsumowanie i wnioski końcowe

Analiza literatury z zakresu wyznaczonego przez temat niniejszej pracy pozwoliła na określenie hipotezy dotyczącej oceny okresu trwałości ściernicy poprzez wykorzystanie sygnału emisji akustycznej. Zakładała ona, że wartość skuteczna sygnału emisji akustycznej pozwoli ona na określenie chwilowej zdolności skrawnej ściernicy oraz dokładniejszą ocenę jej okresu trwałości, niż inne wielkości charakteryzujące przebieg szlifowania.

Dotychczasowe rozwiązania rozpatrywanego problemu, z punktu widzenia potencjalnych zastosowań przemysłowych, charakteryzowały się niezadowalającym wskaźnikiem prawidłowych rozpoznań, który osiągnięto w opracowanych laboratoryjnych systemach diagnostyki. Ponadto, wciąż nierozwiązanym problemem pozostawało znalezienie obiektywnych kryteriów oceny stępienia ściernicy, szczególnie takich, które byłyby skorelowane z jakością technologiczną przedmiotu.

W trakcie realizacji kolejnych etapów niniejszej pracy, zrealizowano wszystkie postawione cele. Natomiast wyniki przeprowadzonych prac badawczych, uzyskane zarówno w fazie wstępnej, jak i podczas szeroko zakrojonych badań właściwych, pozwoliły na potwierdzenie postawionej hipotezy badawczej.

W pierwszej części badań ustalono najkorzystniejsze warunki realizacji szlifowania płaszczyzn ściernicami elektrokorundowymi, które zapewniały najwyraźniejsze korelacje z rejestrowanymi wartościami skutecznymi sygnału emisji akustycznej. Pozwoliło to na znaczne ograniczenie szerokiego spektrum możliwych do przebadania konfiguracji, i umożliwiło w badaniach właściwych skupienie się nad poszukiwaniem obiektywnych kryteriów oceny stępienia ściernicy.

W rezultacie obszernych badań statystycznych sygnału emisji akustycznej wykazano, że istnieje ścisła zależność pomiędzy zjawiskami zachodzącymi w strefie szlifowania, a rejestrowanymi sygnałami wyjściowymi procesu. Z pośród przebadanych czynników wyjściowych, najlepsze korelacje ze zmianami czynnej powierzchni ściernicy wykazała emisja akustyczna w postaci różnych jej parametrów, co przedstawiono w 4. rozdziale niniejszej rozprawy. Najistotniejszy jest jednak fakt, że opracowane modele zależności pomiędzy parametrami sygnału emisji akustycznej, a zdolnością skrawną ściernicy, uwzględniają zmiany makro- i mikrogeometryczne czynnej powierzchni ściernicy. Stanowi to główną zaletę proponowanego rozwiązania i jest podstawą do przyjęcia wybranych parametrów EA, jako wskaźników opisujących chwilowy stan CPS.

Wszystkie przedstawione w pracy wnioski dowodzą postawionej hipotezy i wykazują, że odpowiednio dobrana grupa parametrów sygnału emisji akustycznej oraz właściwa interpretacja ich wartości, pozwala nie tylko na oszacowanie chwilowej zdolności skrawnej ściernicy, ale także na dokonanie pośredniej oceny okresu trwałości narzędzia oraz oszacowanie jakości przedmiotu szlifowanego. Opracowane rozwiązanie opisywanego problemu, ze względu na uniwersalny charakter, daje szerokie możliwości i może być użyteczne nie tylko w procesie szlifowania płaszczyzn, ale także w innych odmianach obróbki skrawaniem. Ponadto, ze względu na ilość i rodzaj czujników, przedstawiona koncepcja systemu nadzorowania procesu stanowi znacznie tańsze rozwiązanie w porównaniu do wielo-czujnikowych układów diagnostyki wyposażonych z reguły jednocześnie w sensory siły, mocy oraz drgań.

6.1. Wnioski poznawcze

Realizacja wytyczonego zakresu prac pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków poznawczych:

- Przeprowadzone badania i wyniki analiz, świadczą w głównej mierze o tym, że sygnał EA niesie ze sobą ilościowe informacje o zjawiskach zachodzących w strefie szlifowania i jest on ściśle powiązany ze zmianami CPS, własnościami fizycznymi warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego, a także częściowo z mikrogeometrycznymi zmianami zachodzącymi na powierzchni próbek.
- Analiza wyników wykazała istnienie relacji o bardzo wysokiej korelacji pomiędzy zmianami geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej (*K_{CPS}*), a zmianami wartości skutecznej EA. Wyniki analiz wyraźnie wykazują, że wraz z postępującą utratą zdolności skrawnej (spadek wartości wskaźnika), rejestrowano coraz większe wartości skuteczne sygnału emisji akustycznej. Oznacza to, że w przypadku dobrej skrawności, gdy impulsy EA pochodzą głównie od odkształceń plastycznych materiału obrabianego (tworzenie wióra), to rejestrowane wartości skuteczne sygnału EA są względnie niskie, a wzrastają, gdy ściernica ulega zużyciu wytrzymałościowemu lub uległa już całkowitemu zużyciu i zaczyna głównie trzeć czynną powierzchnią o materiał obrabiany.
- Wyniki badań wykazały, że do grupy parametrów o największej użyteczności, względem opisu zjawisk zachodzących w strefie szlifowania i oceny utraty zdolności ściernej ściernicy, należą następujące sygnały pomiarowe:
 - natężenie koncentracji wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej ($K(EA_{RMS})$),
 - parametr kurtoza rozkładu *beta* wartości skutecznej sygnału EA ($K_{\beta}(EA_{RMS})$),
 - skośność rozkładu *beta* wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej ($S_{k\beta}(EA_{RMS})$),
 - zmiany nieliniowego modelu $e^{S_{k\beta}(EA_{RMS})}$ odnoszącego się do skośności rozkładu *beta* dla sygnału emisji akustycznej
 - oraz zmiany parametru energetycznego typu $E_{Sk\beta/RMS}$, reprezentującego utratę zdolności skrawnej przez CPS.

Nie jest to grupa stała, gdyż ze względu na aktualne potrzeby, może zostać zredukowana lub rozszerzona, np. o parametry: EA_{RMS} oraz q_{RMS} .

- Analiza statystyczna wykazała, że spośród wszystkich przeanalizowanych pochodnych sygnału emisji akustycznej, współczynnik koncentracji rozkładu *beta* ($K_{\beta}(EA_{RMS})$) jest najbardziej korzystnym parametrem, który można zastosować do opisu zmian związanych ze zużyciem ściernicy. Wynika to z faktu jego wysokiej korelacji z geometrycznym wskaźnikiem zdolności skrawnej (K_{CPS}). Z powodzeniem może on zastąpić w wielu przypadkach najdokładniejszy (i najbardziej pracochłonny) sposób opisu zdolności skrawnej za pomocą stanu mikro- i makrogeometrii CPS.
- Analiza kształtu oraz położenia rozkładu sygnału emisji akustycznej, może być z powodzeniem wykorzystana do wyznaczania końca okresu trwałości ściernicy. Dodatkowo, poprzez odpowiednią interpretację zmian wartości współczynników K_{β} i $S_{k\beta}$, można obserwować kolejne etapy utraty oraz przywracania zdolności skrawnej CPS, zachodzące w miarę upływu czasu szlifowania.
- Analiza wyników badań pozwoliła opracować współczynnik, który ujmuje wartość skuteczną sygnału EA, jako zasadniczy parametr do oceny okresu trwałości ściernicy. Na podstawie znajomości wartości tego parametru można określić aktualny stan (zużycie) ściernicy oraz wskazać potrzebę odnowienia czynnej powierzchni ściernicy, co równo-

ważne jest z dokonaniem oceny okresu trwałości narzędzia. Zaproponowany wskaźnik energii impulsów emisji akustycznej przypadającej na jednostkową powierzchnie kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym (q_{RMS}), stanowi korzystny parametr do oceny przebiegu procesu, co wynika z jego relatywnie wysokiej korelacji z parametrami geometrycznymi CPS. Wskaźnik ten, ze wszystkich przeanalizowanych parametrów sygnału EA, charakteryzuje się najlepszą jakością predykcji wartości mikrogeometrycznych cech powierzchni szlifowanej.

- Wyniki badań ujawniły, że sygnał EA z uwagi na swoje szczególe źródła pochodzenia, stanowi parametr o wysoce selektywnej (szczególnie zależnej od dobranych warunków pracy narzędzia) przydatności w dziedzinie przewidywania wynikowej geometrii powierzchni poddanej procesowi szlifowania. Analiza wyników statystycznych wykazała, że najlepszą korelacją z mikrogeometrycznymi parametrami powierzchni obrabianej wykazały się parametry statystyczne sygnału EA należące do grupy opisującej rozkład wartości sygnału, a w szczególności przedstawiające miarę natężenia (skupienia) poszczególnych elementów wokół wartości średniej, głównie: $K(EA_{RMS})$, $K_{\beta}(EA_{RMS})$ i $S_{k\beta}(EA_{RMS})$. Oznacza to, że pomimo otrzymanej względnie niskiej korelacji sygnału EA z parametrami chropowatości powierzchni obrabianej, sygnał EA przenosi część informacji związanej, także z kształtowaniem się geometrii szlifowanej powierzchni.
- Wyniki badań eksperymentalnych dowiodły bezsprzecznie, że sygnał EA w związku z ujawnionymi bardzo wysokimi korelacjami dla zależności: $K_{\beta}(EA_{RMS}) = f(\sigma_{max}, t)$, może być z powodzeniem wykorzystany do przewidywania wyników obróbki odnośnie do mak-symalnych wartości naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego.

6.2. Wnioski dotyczące wykorzystania wyników pracy

Uzyskane wyniki przeprowadzonych prac badawczych pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków utylitarnych:

- W ramach zrealizowanej pracy zaprojektowano system o strukturze umożliwiającej wyznaczenie aktualnego stanu czynnej powierzchni oraz momentu utraty zdolności skrawnych. System ten oparto na elementach sztucznej inteligencji, co pozwoliło na zawarcie w jego strukturze ukrytych zależności, które nie zostały ujawnione w trakcie analizy wyników badań eksperymentalnych. Opracowany system nadzorowania, a w szczególności jego część odpowiedzialna za monitorowanie procesu obróbki, wiąże sygnał EA z parametrami geometrycznymi CPS, ale równocześnie pozwala uniknąć całego otoczenia pomiarów wielu różnego rodzaju sygnałów. Tym samym zrealizowano kolejny cel pracy, który zakładał opracowanie systemu diagnostyki ściernicy o maksymalnie uproszczonej budowie.
- Skonstruowany system wnioskowania rozmytego został przebadany dla danych z procesu szlifowania, potwierdzając wysoką użyteczność logiki rozmytej w zakresie określania stanu zużycia narzędzia, co świadczy o jego predyspozycji do podejmowania decyzji w całym systemie.
- Analiza otrzymanych wyników świadczy o bardzo efektywnym działaniu układu opartego na wnioskowaniu rozmytym. W funkcji czasu pracy ściernicy zaobserwować można bardzo wyraźny trend w zmianach porównywanych parametrów. W czasie, gdy geometryczny wskaźnik zdolności skrawnej (*K*_{CPS}) maleje, to zużycie ściernicy oszacowane przez system, a określone poprzez parametr y* rośnie.
- Szczególną cechą opracowanego układu FIS, wynikającą z jego źródła (sygnał EA) jest jego reakcja na nagłe znaczące zmiany sygnałów. Dzięki temu w przypadku wystąpienia

momentu samoostrzenia ściernicy, zdarzenie to można obserwować na wyjściu układu w postaci chwilowego spadku wartości y^* .

- Jak wynika z analizy zbiorów przybliżonych, z tablicy decyzyjnej systemu wnioskowania rozmytego FIS, można usunąć do trzech czynników wejściowych, przy jednoczesnym zachowaniu prawidłowości działania systemu. Oznacza to, że w opracowanym systemie, dominujące znaczenie w ocenie stopnia zużycia ściernicy miały wartość prędkości posuwu stycznego stołu szlifierki, czyli aktualne obciążenie ściernicy w strefie szlifowania, oraz dwie pochodne emisji akustycznej w postaci parametrów: kurtoza i skośność rozkładu *beta* dla wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej.
- Analiza wyników działania zaproponowanego układu FIS, pozwala jednoznacznie stwierdzić, że wyznaczone reguły decyzyjne z atrybutami rozmytymi mogą być stosowne do klasyfikacji stanu zużycia ściernicy, a zwłaszcza do wysłania (do systemu lub operatora) sygnału o całkowitej utracie zdolności skrawanej ściernicy i zakończenia jej okresu trwałości. Jeżeli w trakcie szlifowania system będzie rejestrował czas pracy ściernicy, to opracowane narzędzie pozwoli tylko przy pomocy analizy sygnału EA określić chwilową zdolności skrawną narzędzia (w skali 0 – 10) oraz dokładnie ocenić jego okres trwałości, a więc czas między dwoma kolejnymi obciągnięciami.

6.3. Wnioski dotyczące dalszych badań

Przeprowadzone w ramach niniejszej pracy badania eksperymentalne oraz ich analizy potwierdzają duże znaczenie sygnału emisji akustycznej w ocenie zjawiska zużywania CPS, jednakże nie wyczerpują całego zasobu zagadnień związanych z procesem szlifowania i jego nadzorowaniem. Potrzebna jest kontynuacja prac badawczych w tej dziedzinie.

W szczególności ważne jest przeprowadzenie szczegółowych badań z uwzględnieniem ściernic zbudowanych z różnego rodzaju ziaren ściernych (elektrokorund, CBN²¹, SG²², itp.) oraz o większym przedziale twardości narzędzia. Proponuje się też, dokonać analizy relacji pomiędzy sygnałem emisji akustycznej, a innymi czynnikami wyjściowymi procesu w przypadku jednoprzejściowego szlifowania otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie.

Następnym istotnym zagadnieniem jest udoskonalenie przetwarzania sygnałów emisji akustycznej z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji odnośnie wymagań jakościowych. Bardzo użytecznym źródłem informacji o przebiegu procesu może być, też analiza częstotliwościowa nieprzetworzonego sygnału EA. Przewiduje się, że wybrane przedziały częstotliwości są silnie skorelowane z zjawiskami zachodzącymi w przedmiocie obrabianym, przez co ich analiza mogłaby znacznie ułatwić przewidywanie jakości wyrobu i doprowadzić do kolejnych uproszczeń systemu nadzorowania procesu szlifowania.

W dalszych badaniach eksperymentalnych zalecane jest też przeprowadzenie wnioskowania o korzyściach w zastosowaniu czujnika bezstykowego, dla którego ośrodkiem przenoszenia fali dźwiękowej jest strumień chłodziwa.

²¹ CBN (*Cubic Boron Nitride*) – regularny azotek boru.

²² SG (*Seeded Gel*) – mikrokrystaliczny korund spiekany wytwarzany metodą zarodkowania w żelu.

BIBLIOGRAFIA

- [Bar1982] BARNETT V.: *Elementy teorii pobierania prób.* Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1982. ISBN 83-01-01129-7.
- [Bat1997] BATES C.A.: *Keeping Your Ear to the Grindstone*. American Machinist 1997, D52-56.
- [Ber2001] BERGER M. (*et al.*): *Słownik naukowo-techniczny angielsko-polski*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2001. ISBN 83-204-2744-4.
- [Boc2003] BOCZAR T.: Możliwości zastosowania do opisu sygnałów emisji akustycznej od wyładowań niezupelnych analizy statystycznej i cyfrowych metod przetwarzania sygnałów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole, 2000. ISBN 1429-6063.
- [Bor1983] BORKOWSKI J.: *Elementarne zjawiska zużycia narzędzi ściernych*. Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Koszalinie, Monografia Wydziału Mechanicznego, Koszalin, 1983.
- [BPH1990] BRECKENRIDGE F., PROCTOR T., HSU N., FICK S., EITZEN D.: *Transient Sources for Acoustic Emission Work*. Progress in Acoustic Emission V, The Japanese Society for NDI, 1990, □20-37.
- [BS1997] BRONSZTEJN I.N., SIEMIENDIAJEW K.A.: *Matematyka. Poradnik encyklopedyczny.* Wydawnictwo Naukowe PWN, wydanie 14, Warszawa, 1997. ISBN: 83-01-11658-7.
- [BB1997] BUREK J., BABIARZ R.: Zastosowanie emisji akustycznej do sterowania adaptacyjnego procesem szlifowania. XX Jubileuszowa Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Poznań-Błażejewko, 1997, D65-68.
- [BB2000] BUREK J., BABIARZ R.: Układ sterowania adaptacyjnego chropowatością *i falistością powierzchni w procesie szlifowania*. XXIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Rzeszów-Myczkowce, 2000, □319-325.
- [BBO2001] BUREK J., BABIARZ R., OSTROWSKI P.: *Regulacja procesu szlifowania z adaptacją wartości regulowanej*. XXIV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Łopuszna, 2001, □311-316.
- [CB2002] CHMIELEWSKI K., BERCZYŃSKI S.: *Statystyka matematyczna. Ćwiczenia laboratoryjne z wykorzystaniem pakietu STATISTICA PL.* Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin, 2002. ISBN 83-88764-26-8.
- [DOB03] DOBRZAŃSKI L. A. (red.) Leksykon materiałoznawstwa: praktyczne zestawienie norm polskich, zagranicznych i międzynarodowych: metale, polimery, ceramika, kompozyty. Wydawnictwo Verlag Dashofer, Warszawa 2003. ISBN 83-910914-1-4.
- [DOB04] DOBRZAŃSKI L. A. *Metalowe materiały inżynierskie*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004. ISBN 83-204-3045-3.
- [DH1984] DORNFELD D., CAI H.G.: An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission. ASME Journal of Engineering. for Industry 1984, vol. 106, no. 1, □28-33.

- [DP1999] DRZYCIMSKI M., PLICHTA S.: Nadzorowanie stanu naprężeń własnych w warstwie wierzchniej szlifowanego przedmiotu metodą sygnału emisji akustycznej. XXII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Gdańsk, 1999, D111-116.
- [Dud1996] DUDEK P.: Diagnozowanie stanu naprężeń własnych w warstwie wierzchniej szlifowanego przedmiotów szlifowanych ściernicami CBN z zastosowaniem emisji akustycznej. Praca dyplomowa. Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Technologii Maszyn i Automatyzacji, Koszalin, 1996.
- [EK1984] EDA H., KISHI K.: *In-Process Detection of Grinding Burn by Means of Utilizing Acoustic Emission*. Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, 1984, vol. 18, no. 4, D299-304.
- [EK1985] EDA H., KAKINO Y.: In-Process Detection of Grinding Cracks by the Use of Acoustic Emissions. Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, 1985, vol. 19, no. 3, D181-186.
- [FCO1999] FILHO N.M., COELHO R.T., OLIVEIRA J.F.G.: Analysis of Dressing Performance Using single Crystal Diamond Dressers. Industrial Diamond Review 2/99, D133-142.
- [GD1994] GOMES DE OLIVEIRA J.F., DORNFELD D.A.: Dimensional Characterization of Grinding Wheel Surface through Acoustic Emission. Annals of the CIRP, vol. 43/1/1994, 1994, □291-294.
- [GD2001] GOMES DE OLIVEIRA J.F., DORNFELD D.A.: Application of EA Contact Sensing in Reliable Grinding Monitoring. Annals of the CIRP, vol. 50/1/2001, 2001, □217-220.
- [Gor1998] GÓRECKA R.: *Teoria i technika eksperymentu*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 1998.
- [HYU2001] HOSOKAWA A., YAMADA K., UEDA T.: *Practical Monitoring System of Grinding Wheel Surface*. Advances in Manufacturing Science and Technology, vol. 25, no. 2/2001, D5-19.
- [HLR1994] HUNDT W., LEUENBERGER D., REHSTEINER F.: An Approach to Monitoring of the Grinding Process Using Acoustic Emission (AE) Technique. Annals of the CIRP, vol. 43/1/1994, □295-298.
- [Ina1985] INASAKI I.: Monitoring of Dressing and Grinding Processes with Acoustic Emission signals. Annals of the CIRP, vol. 34/1/1985, D277-280.
- [Ina1991] INASAKI I.: *Monitoring and Optimization of Internal Grinding Processes*. Annals of the CIRP, vol. 40/1/1991, □359-362.
- [Ina1998] INASAKI I.: Sensor Fusion for Monitoring and Controlling Grinding Process. V International Conference on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing – AC'98. Warszawa 1998, D23-43.
- [JD1996] JAWORSKI B.M., DIETŁAF A.A.: *Fizyka. Poradnik encyklopedyczny.* Wydawnictwo Naukowe PWN, wyd. 2, Warszawa 1996. ISBN: 83-01-11858-X.
- [KPP1978] KACALAK W., PLICHTA J., PLICHTA S.: Wpływ czasu szlifowania na naprężenia ostateczne w warstwie wierzchniej. Konferencja "Postępy w Technice Wytwarzania", cz. I, Narzędzia i technologia obróbki ściernej. Kołobrzeg, 1978, □148-160.

- [Kac1985] KACALAK W.: Własności eksploatacyjne narzędzi ściernych i problemy ich oceny. VIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Wydawnictwo WSInż, Koszalin, 1985, D113-133.
- [Kac1996] KACALAK W.: Metody i zastosowania sztucznej inteligencji do diagnostyki, optymalizacji i sterowania w procesach szlifowania. XIX Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Łódź 1996, D231-246.
- [Kac1970] KACZMAREK J.: *Podstawy obróbki wiórowej, ściernej i erozyjnej*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1970, D577-628.
- [Kac1999] KACZMAREK J.: Zastosowanie metody SCGC do oceny technologii i prognozy użytkowania powierzchni obrabianych skrawaniem. Wrocław: Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, seria "Konferencje", (1999)74, zeszyt 34, □5-19.
- [Kel1963] KELLER C.: Wpływ metod i warunków obróbki ściernej wykańczającej na naprężenia własne w warstwie wierzchniej materiałów narzędziowych. Mechanik nr 3/63, Warszawa, 1963, □121-124.
- [Koc1989] KOCHANIEWICZ P.: Analiza wybranych wielkości metrologicznych charakteryzujących powierzchnie techniczne. Zbiór prac XI Międzynarodowego Sympozjum Naukowego studentów i młodych pracowników nauki pt. Mechanika - technika biomedyczna i biocybernetyka, Zielona Góra, 1989.
- [Koz1996] KOZIARSKI A.: *Czynna powierzchnia ściernicy. Metody badań makro- i mikrogeometrii.* Politechnika Łódzka, Monografie, Łódź 1996.
- [Kru1994] KRUSZYŃSKI B.: *Wpływ obróbki na właściwości warstwy wierzchniej*. Przegląd Mechaniczny, rok wyd. LIII, z. 3/94, ^D7-12.
- [KL1991] KRUSZYŃSKI B., LUTTERVELT C.A. van: An Attempt to Predict Residual Stresses in Grinding of Metals with the Aid of a New Grinding Parameter. Annals of the CIRP, vol. 40/1/1991. D335-337.
- [KW1997] KRUSZYŃSKI B., WÓJCIK R.: Wpływ gęstości strumienia energii szlifowania na naprężenia własne warstwy wierzchniej. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, vol. 17, nr 2, KBM PAN, Poznań, 1997, D35-42.
- [Kuk2000] KUKIEŁKA L.: *Podstawy badań inżynierskich*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2000, ISBN 83-88283-26-X.
- [Kuk2002] KUKIEŁKA L.: *Podstawy badań inżynierskich*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 2002, ISBN 83-01-13749-5.
- [KS2001] KWAK J., SONG J.: *Trouble Diagnosis of the Grinding Process by Using Acoustic Emission Signals*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 41/2001, D899-913.
- [Lez1998] LEŻAŃSKI P.: Diagnostyka stanu ściernicy oparta na metodach sztucznej inteligencji. XXI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Warszawa-Miedzeszyn, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1998, D91-96.
- [Lez1996] LEŻAŃSKI P.: Inteligentny nadzór procesu szlifowania. XIX Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Łódź 1996, 🗅 351-356.
- [LL2000] LEŻAŃSKI P., LAJMERT P.: *Diagnostic of Cylindrical Grinding Process* with Acoustic Emission Signals. IX Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems Manuf. Simulation for Industrial Use, D251-258.

- [LR1993] LEŻAŃSKI P., RAFAŁOWICZ J.: An Intelligent Monitoring System for Cylindrical Grinding. Annals of the CIRP, vol. 42/1/1993, D393-396.
- [LPG1989] LIERATH F., POPKE H., GOLDAU H.: System czujników do nadzorowania narzędzi przy wykorzystaniu emisji akustycznej. Thumaczenie: Andrzej Kusyk. Mechanik nr 5/89, □179-182.
- [Maj1998] MAJERSKI M.: Ocena naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego z wykorzystaniem sygnału emisji akustycznej. Praca dyplomowa. Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Produkcji, Koszalin, 1998.
- [MO1994] MALECKI I., OPILSKI A.: Charakterystyka i klasyfikacja sygnałów EA. W: [MR1994]. Komitet Badań Naukowych, Wydawnictwo Biuro PASCAL, Warszawa 1994, □19-33.
- [MR1994] MALECKI I., RANACHOWSKI J.: *Emisja akustyczna źródła, metody, zastosowania*. Komitet Badań Naukowych, Wydawnictwo Biuro PASCAL, Warszawa 1994, ISBN 83-901945-0-3.
- [Mar1999] MARCINIAK M.: *Proces szlifowania w ujęciu fenomenologicznym*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Prace Naukowe, Mechanika, z. 178, Warszawa 1999.
- [MR2000] MOSZCZYŃSKI L., RANACHOWSKI Z.: *Emisja akustyczna w zastosowaniu do monitorowania procesów wykrawania*. Przegląd Mechaniczny, nr 3/2000, 25-30.
- [Nar1969] NARA I.: *Two Dimensional Representation of Surface Roughness*. Annals of the CIRP, vol. 17/4/1969, D485-494. (W: [Now1991]).
- [Nor2006] NORDMANN GmbH & Co. KG.: *Materiały informacyjne oraz dokumentacja techniczna urządzeń firmy* [dostęp: 12 luty 2006]. Dostępny pod adresem: www.nordmann.info.
- [Now1991] NOWICKI B.: *Struktura geometryczna. Chropowatość i falistość powierzchni.* Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1991. ISBN 83-204-1304-4.
- [OB2000] OCZOŚ K., BUREK J.: Sterowanie chropowatością i falistością powierzchni w procesie szlifowania. Zbiór materiałów z Międzynarodowej Konferencji Naukowej "Obróbka Materiałów", Kraków, 2000, □223-230.
- [OP1986] OCZOŚ K., PORZYCKI J.: *Szlifowanie. Podstawy i technika.* Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1986. ISBN 83-204-0771-0.
- [OD1994] OLIVEIRA J.F.G, DORNFELD D.A.: Dimensional Characterization of Grinding Wheel Surface through Acoustic Emission. Annals of the CIRP, vol. 43/1/1994, 1994, 2291-294.
- [OD2001] OLIVEIRA J.F.G, DORNFELD D.A.: Application of EA Contact Sensing In Reliable Grinding Monitoring. Annals of the CIRP, vol. 50/1/2001, 2001, D217-220.
- [PliJ1980] PLICHTA J.: Wybrane zagadnienia oceny topografii roboczej powierzchni ściernicy procującej obwodem. Rozprawa doktorska. Politechnika Wrocławska, Wrocław, 1980.

- [Pil1991] PILECKI S.: Metody akustyczne w badaniach metali. W: [Ran1991]. Polska Akademia Nauk Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Warszawa, 1991, □71-156.
- [Pil1994] PILECKI S.: *Emisja akustyczna w metalach*. W: [MR1994]. Komitet Badań Naukowych, Warszawa 1994, D125-162.
- [PliJ1984] PLICHTA J.: Ocena okresu trwałości ściernicy metodą fotometrycznego pomiaru stopnia ściernego zużycia jej powierzchni roboczej. VII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Gdańsk, 1984, D169-181.
- [PliJ1986] PLICHTA J.: Sprawozdanie z badań porównawczych własności eksploatacyjnych i trwałości ściernic tarczowych płaskich i trzpieniowych o różnej reaktywności spoiwa. Wyższa Szkoła Inżynierska w Koszalinie, 1986.
- [PliJ1988.1] PLICHTA J.: Próba kompleksowej oceny zmian stanu roboczej powierzchni ściernicy podczas szlifowania. Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego nr 12, Wyższa Szkoła Inżynierska w Koszalinie, Konferencja "Narzędzia skrawające i ścierne. NASS'88", Koszalin, 1988, □245-252.
- [PliJ1988.2] PLICHTA J.: Wpływ zmian stanu roboczej powierzchni ściernicy podczas jej pracy na wielkość siły w strefie szlifowania. Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego nr 12, Wyższa Szkoła Inżynierska w Koszalinie, Konferencja "Narzędzia skrawające i ścierne. NASS'88", Koszalin, 1988, D237-244.
- [PliJ1988.3] PLICHTA J.: Wpływ zużycia ściernicy na niestacjonarność topografii jej powierzchni roboczej. X Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Łódź, 1988, □17-24.
- [PC1985] PLICHTA J., CZUCHRYTA Z.: Fotometryczna metoda identyfikacji rodzaju zużycia ściernicy. Mechanik, nr 7, 1985, \[D]407-410.
- [PliS1986] PLICHTA S.: Zmiany topografii roboczej powierzchni ściernicy podczas szlifowania i ich wpływ na własności fizyczne warstwy wierzchniej przedmiotu. Rozprawa doktorska, Instytut Technologii Budowy Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1986.
- [PliS1988] PLICHTA S.: Wpływ geometrycznych skutków zużycia ściernicy na naprężenia własne w warstwie wierzchniej szlifowanego przedmiotu. XI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Łódź 1988, □117-124.
- [PliS1998.1] PLICHTA S.: Identyfikacja zużycia pojedynczych ziaren ściernych podczas mikro-skrawania metodą emisji akustycznej. XXI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Warszawa-Miedzeszyn, 1998, D142-145.
- [PliS1998.2] PLICHTA S.: Ocena właściwości skrawnych ziaren ściernych metodą emisji akustycznej. XXI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Warszawa-Miedzeszyn, 1998, □138-141.
- [PliS1999] PLICHTA S.: Możliwości wykorzystania emisji akustycznej w badaniach właściwości skrawnych ziaren ściernych. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, vol. 23, nr 1/1999, □97-111.
- [PliS2002] PLICHTA S.: Ocena procesu szlifowania z wykorzystaniem metod pomiaru emisji akustycznej. XXV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Wrocław-Duszniki Zdrój, 2002, D279-285.

- [PD1999] PLICHTA S., DRZYCIMSKI M.: Możliwości monitorowania procesu szlifowania z wykorzystaniem sygnału emisji akustycznej. XXII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Gdańsk-Jurata, 1999, □223-238.
- [PD2002] PLICHTA S., DRZYCIMSKI M.: Identification of Single Abrasive Grains Wear While Microcutting by Application of Signal of Acoustic Emission. Advances In Manufacturing Science And Technology, vol. 26, No.4, 2002, D5-20.
- [PDP2000] PLICHTA S., DRZYCIMSKI M., PLICHTA J.: Koncepcja układu sterowania szlifierki z wykorzystaniem sieci neuronowej. XXIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Rzeszów-Myczkowce, 2000, □223-238.
- [PP1990] PLICHTA S., PLICHTA J.: Prognozowanie naprężeń w warstwie wierzchniej szlifowanego przedmiotu na podstawie czynnego pomiaru stanu roboczej powierzchni ściernicy. Ogólnopolska VI Konferencja "Tendencje rozwojowe w technologii maszyn", Wyższa Szkoła Inżynierska, Zielona Góra, 1990, Sekcja I - Obróbka Skrawaniem, □141-147.
- [Pol1984] POLAŃSKI Z.: *Planowanie doświadczeń w technice*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1984. ISBN: 83-01-04507-8.
- [PWN2004] PAŃSTWOWE WYDAWNICTWA NAUKOWE. *Nowa Encyklopedia PWN*. 8 tomów, Warszawa, 2004. ISBN: 83-01-14180-8.
- [RLL2000] RAFAŁOWICZ J., LEŻAŃSKI P., LAJMERT P.: Sterowanie i nadzorowanie procesu szlifowania kłowego wałków. XXIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Rzeszów-Myczkowce, 2000, □89-117.
- [Ran1991] RANACHOWSKI J.: *Problemy współczesnej akustyki*. Polska Akademia Nauk Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Warszawa, 1991.
- [Rol1998] ROLKA L.: *Metody sztucznej inteligencji w ocenie zużycia ściernic*. Rozprawa doktorska. Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 1998.
- [SWM1985] SCHUNK WERTH MESSTECHNIK, GmbH: WERTH Working Instructions. OPTIMUS G. A 423e. Giessen, Niemcy, 1985.
- [Smo1997] SMORAWSKI D.: Badanie procesu pękania ziaren ściernych metodą emisji akustycznej. Praca Magisterska, Politechnika Koszalińska, 1997.
- [Sta2000] STANISZ A.: Podstawy statystyki dla prowadzących badania naukowe. Odcinek 22: Analiza regresji – regresja liniowa. Medycyna Praktyczna 2000/11, Kraków 2000, □152-155. [dostęp: 07 czerwiec 2006]. Dostępny pod adresem: http://www.mp.pl/artykuly/?aid=10899.
- [Sta2001] STATSOFT, Inc.: *STATISTICA (data analysis software system)*, version 6. 2001, <u>www.statsoft.com</u>.
- [SP2004] SUTOWSKI P., PLICHTA S.: Wykorzystanie wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej do oceny zużycia ściernicy. XXVII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Koszalin-Sarbinowo, 2004, □449-456.
- [Tad1993] TADEUSIEWICZ R.: *Sieci neuronowe*. Akademicka Oficyna Wydawnicza RM, Wyd. 2, Warszawa 1993.
- [TN1986] TSUKADA T., NOGUCHI S.: An Assessment of Surface Roughness by Specific Intensity Distribution of Reflected Light. Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, vol. 20/3/1986, [203-205. (W: [Now1991]).

- [Urb2002] URBANIAK M.: *Systemy oceny użytkowych własności ściernic*. Monografia. Politechnika Łódzka, Zeszyty Naukowe, nr 913, Łódź 2002. ISSN: 0137-4843.
- [WW2001] WANG Z., WILLETT P.: Neural Network Detection of Grinding Burn From Acoustic Emission. International Journal of Machine Tools & Manufacture 41/2001, D283-309.
- [WDL1996] WEBSTER J., DONG W., LINDSAY R.: *Raw Acoustic Emission Signal Analysis of Grinding Process*. Annals of the CIRP, vol. 45/1/1996, \Begin{array}{c} 335-340. \\ \end{array}
- [WMB1994] WEBSTER J., MARINESCU I., BENNETT R.: Acoustic Emission for Process Control and Monitoring of Surface Integrity during Grinding. Annals of the CIRP, vol. 43/1/1994, □299-304.

Wykaz norm

- [N86/85023] PN-86/H-85023 : 1986. Stal narzędziowa stopowa do pracy na zimno. Gatunki.
- [N87/04251] PN-87/M-04251 : 1987. Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość powierzchni. Wartości liczbowe parametrów.
- [N87/4256/2] PN-87/M-04256/02 : 1987. Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość powierzchni. Terminologia ogólna.
- [N91/04355] PN-91/H-04355 : 1991. Pomiar twardości metali sposobem Rockwella. Skale A, B, C, D, E, F, G, H, K.
- [N92/1002/4] PN-92/M-01002/04 : 1992. Podstawowe pojęcia w obróbce wiórowej i ściernej. Siły, energia i moc.
- [N92/1002/5] PN-92/M-01002/05 : 1992. Podstawowe pojęcia w obróbce wiórowej i ściernej. Terminologia podstawowa w procesach szlifowania ściernicami.
- [N99/4287] PN-EN ISO 4287 : 1999. Specyfikacje geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- [N00/31-1] PN-ISO 31-1 : 2000. Wielkości fizyczne i jednostki miar. Część 1: Przestrzeń i czas.
- [N00/31-3] PN-ISO 31-3 : 2000. Wielkości fizyczne i jednostki miar. Część 3: Mechanika.
- [N01/31-2] PN-ISO 31-2 : 2001. Wielkości fizyczne i jednostki miar. Część 2: Zjawiska okresowe i zjawiska z nimi związane.
- [N01/31-7] PN-ISO 31-7 : 2001. Wielkości fizyczne i jednostki miar. Część 7: Akustyka.
- [N01/525] PN-ISO 525 : 2001. Narzędzia ścierne spojone. Wymagania ogólne.
- [N01/603-4] PN-ISO 603-4 : 2001. Narzędzia ścierne spojone. Wymiary. Część 4: Ściernice do szlifowania płaszczyzn/szlifowania obwodowego.
- [N02/31-4] PN-ISO 31-4 : 2002. Wielkości fizyczne i jednostki miar. Część 4: Ciepło.
- [N02/31-5] PN-ISO 31-5 : 2002. Wielkości fizyczne i jednostki miar. Część 5: Elektryczność i magnetyzm.
- [N02/6103] PN-ISO 6103 : 2002. Wyroby ścierne spojone. Dopuszczalne niewyważenie ściernic w stanie dostawy. Badanie. Zastępuje: PN-54/M-59118 : 1954. Ściernice tarczowe. Wyważenie statyczne.