

Paweł SUTOWSKI^{1*}
Wojciech KAPŁONEK¹
Krzysztof NADOLNY¹

EMPIRYCZNA ESTYMACJA CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI ORAZ SKŁADOWYCH SIŁY SZLIFOWANIA I SYGNAŁU EMISJI AKUSTYCZNEJ W PROCESIE SZLIFOWANIA POWIERZCHNI PŁASKICH

W artykule przedstawiono empiryczne modele wybranych parametrów wyjściowych procesu szlifowania powierzchni płaskich stali NC10 z zastosowaniem ściernicy z ziarnami elektrokorundu szlachetnego 99A. Dwuparametryczne modele regresyjne opracowano dla: chropowatości powierzchni, składowych sił szlifowania oraz sygnału emisji akustycznej. Modele te pozwalają na wybór optymalnych parametrów procesu szlifowania ze względu na wartość składowych sił oraz emisję fal naprężeń występujących w strefie obróbki, jak i uzyskiwaną jakość powierzchni przedmiotu. Funkcje mogą być zastosowane do weryfikacji modeli symulacyjnych lub w celu uniknięcia ewentualnych defektów termicznych powierzchni przedmiotu obrabianego i uzyskania zakładanej dokładności i powtarzalności obróbki.

1. WPROWADZENIE

Procesy obróbki wykończeniowej, takie jak, m.in. szlifowanie są wykorzystywane do kształtowania przedmiotów charakteryzujących się najwyższą jakością powierzchni i wąskimi polami tolerancji wymiarów. Drgania występujące w strefie szlifowania mogą utrudniać uzyskanie zakładanej dokładności obróbki, a także mieć znaczący wpływ na jakość uzyskanej powierzchni. W przypadku stosowania ściernic z ziarnami konwencjonalnymi (np. elektrokorundu szlachetnego 99A) proces zużycia może powodować powstawanie błędów kształtu narzędzia (np. fal na obwodzie) i wywoływać drgania samowzbudne w procesie szlifowania [1],[5],[11],[19]. Jeśli amplituda tych fal i w rezultacie wynikające z nich drgania w procesie będą zbyt duże, to narzędzie może ulec uszkodzeniu (np. w wyniku pęknięcia), co skutkować może powstaniem nieodwracalnych defektów powierzchni materiału obrabianego lub nawet szlifierki.

W celu monitorowania lub eliminowania niekorzystnych warunków szlifowania i ewentualnych drgań układu OUPN, można wprowadzić systemy nadzorowania procesu lub skorzystać z systemów eksperckich pozwalających dobrać optymalne parametry obróbki. Aby dokonać predykcji wartości siły szlifowania i drgań ściernicy w strefie

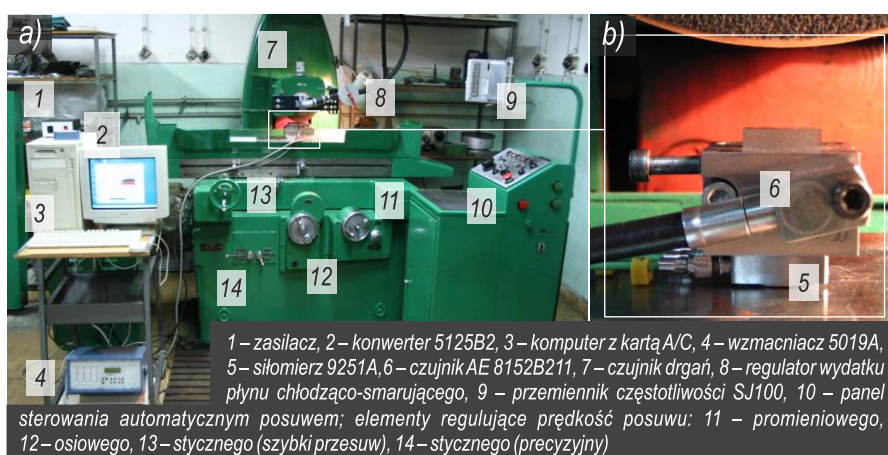
¹ Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Produkcji, Koszalin

* E-mail: pawel.sutowski@tu.koszalin.pl

szlifowania przeprowadza się badania podstawowe, uzyskując wiedzę o relacjach między parametrami obróbki a przebiegiem procesu i jego wynikami [4],[7],[20]. W celu skutecznego wykorzystania tej wiedzy wyznaczane są modele regresyjne dla czynników wyjściowych, którymi najczęściej są mierzona moc oraz siła szlifowania [11],[16],[17],[21], jak i wartość skuteczna emisji akustycznej (ang. *acoustic emission*, AE) [1],[6],[9],[10],[12],[13],[15].

2. METODYKA BADAŃ

Badania eksperymentalne przeprowadzono na stanowisku zbudowanym z użyciem uniwersalnej szlifierki do powierzchni płaskich produkcji rosyjskiej typu OC3, model 3711 (rys. 1) oraz torów pomiarowych do monitorowania siły szlifowania i emisji akustycznej. Szlifierka posiadała zmodyfikowane wrzeciono, co pozwoliło na bezstopniowy dobór prędkości obrotowej ściernicy za pomocą przemiennika częstotliwości SJ100 firmy Hitachi Ltd. (Japonia). W badaniach szlifowano próbki o wymiarach $19 \times 8 \times 20$ mm, wykonane ze stali narzędziowej NC10 o twardości 60 ± 2 HRC.



Rys. 1. Stanowisko badawcze wykorzystujące szlifierkę typu OC3-3711:

a) widok ogólny, b) uchwyt próbki z zamocowanymi czujnikami siły szlifowania oraz emisji akustycznej

Fig. 1. Experimental setup based on grinder type OC3-3711:

a) general view, b) the sample holder with grinding force and acoustic emission attached sensors

Do obróbki tego materiału zastosowano miękką ściernicę elektrokorundową wykonaną w Fabryce Narzędzi Ściernych w Grodzisku Mazowieckim, oznaczoną symbolem PN-ISO 603-4:2001-1-250 \times 32 \times 98-99A60J7V-42m/s. Jest to ściernica konwencjonalna typu T1 zbudowana z ziaren ściernych elektrokorundu szlachetnego 99A, połączonych spoiwem ceramicznym. Badania przeprowadzono z udziałem chłodziwa podawanego metodą zalewową ($Q_{PCS} = 3$ dm³/min). Zastosowano syntetyczny płyn chłodząco-smarujący typu Cimtech D18 (Cimcool Industrial Products B.V.). Zgodnie z zaleceniami producenta, płyn rozcieńczono z wodą stosując stężenie 3,0%. Wszystkie pomiary dokonano dla ściernicy

ostrej, stosując w zabiegu obciążania (przywracania własności skrawnej) obciążacz jednoziarnisty oraz parametry: $a_d = 0,05$ mm, $v_{fd} = 230$ mm/min, $v_s = 18$ m/s.

Sygnały wyjściowe procesu mierzono przy użyciu specjalistycznych urządzeń firmy Kistler Instrument Corp. (Szwajcaria). Siła szlifowania była mierzona z użyciem siłomierza typu 9251A, natomiast sygnał emisji akustycznej rejestrowano czujnikiem typu 8152A2. Sygnały pochodzące z siłomierza były przetwarzane w wielokanałowym wzmacniaczu ładunku typu 5019A. Sygnał AE pochodzący ze strefy szlifowania, rejestrowano przy pomocy piezoelektrycznego czujnika w zakresie częstotliwości 50–900 kHz. Czujnik emisji akustycznej przytwierdzono bezpośrednio do powierzchni próbki w odległości kilkunastu milimetrów od strefy szlifowania, zapewniając tym samym jego korzystne usytuowanie, co przełożyło się na wprowadzanie minimalnych zakłóceń i pomijalne tłumienie analizowanej fali akustycznej.

Sygnał emisji podlegał dodatkowo wzmocnieniu i odfiltrowaniu w konwerterze typu 5125A, który wyznaczał także wartość skuteczną emisji (AE_{rms}) ze stałą czasową 0,12 ms. Wielkości analogowe były przetwarzane na postać cyfrową z wykorzystaniem mikrokomputera, który wyposażony został w kartę z przetwornikiem analogowo-cyfrowym typu DAS-1601 wyprodukowaną przez Keithley Instruments, Inc. (USA). Karta wyposażona w przetwornik 12-bitowy, pracowała w zakresie ± 10 V i charakteryzowała się błędem przetwarzania $\pm 0,0059$ V. Wszystkie sygnały poddano akwizycji z częstotliwością $f = 32000$ Hz i zapisano w jednostkach napięcia w zakresie ± 10 V.

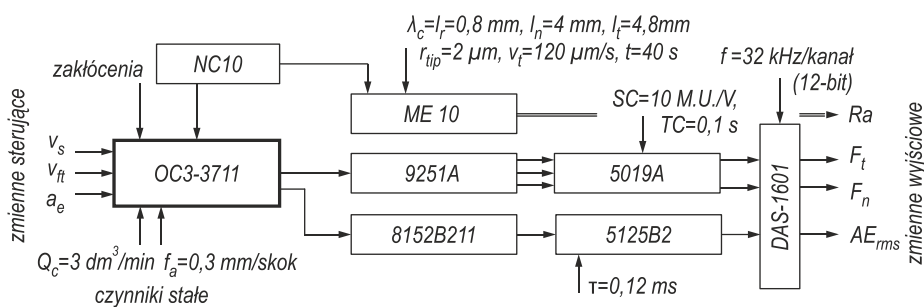
Jakościowej oceny rezultatów obróbki dokonano na podstawie charakterystyki mikrogeometrii szlifowanych powierzchni. Chropowatość powierzchni szlifowanych próbek opisano wyznaczając profil zarysu powierzchni obrobionej w kierunku porzecznym do śladów szlifowania. Profile zmierzono z użyciem profilometru Carl Zeiss Jena typu ME 10 (Niemcy). Do analizy profili zastosowany został program TalyMap Universal 3.1, wykorzystujący Mountain Technology™ dostarczoną przez firmę Digital Surf (Francja).

Badania oraz analizy wyników prac eksperymentalnych podzielono na dwa etapy. W pierwszym, zbadano istotność wpływu poszczególnych parametrów procesu szlifowania na czynniki wyjściowe. Do istotnych parametrów wejściowych zaliczono: prędkość obwodową ściernicy (v_s), prędkość posuwu stycznego (v_{ft}) oraz wielkość głębokości szlifowania (a_e). Zgodnie z zaleceniami podanymi przez Oczóś i Porzycki [14], badania przeprowadzono z prędkościami obwodowymi ściernicy odpowiednimi dla szlifowania płaszczyzn w zakresie $v_s = 25$ -35 m/s. Prędkość posuw ustalono w zakresie wyznaczonym możliwościami technicznymi szlifierki, na której realizowane były badania: $v_{ft} = 4, 14$ oraz 24 m/min. Zmienność dosuwu a_e przyjęto w zakresie od 0,01 mm do 0,04 mm. Dla zastosowanych parametrów otrzymano wydajność objętościową szlifowania równą odpowiednio: 0,6 mm³/s (dla $v_{ft} = 4$ m/min), 2,1 mm³/s oraz 3,6 mm³/s.

Do nadzorowanych czynników wyjściowych przebiegu i rezultatów procesu szlifowania zaliczono natomiast: chropowatość powierzchni obrobionej określone średnim arytmetycznym odchyleniem profilu od linii średniej (Ra), rejestrowane wartości skuteczne wysokoczęstotliwościowego sygnału emisji akustycznej (AE_{rms}) oraz siłę szlifowania – określoną przez składowe: normalną (F_n) oraz styczną (F_t) – rys. 2.

Rezultaty etapu pierwszego pozwoliły ustalić istotne czynniki dla oszacowania modeli statystycznych zmiennych wyjściowych procesu szlifowania. Do opracowania tych modeli

posłużono się wcześniej zgromadzonymi danymi eksperymentalnymi oraz specjalistycznym oprogramowaniem *Experiment Planner* (wersja: 1.0, Politechnika Koszalińska), równaniami współczynników korelacji wielowymiarowej oraz testem Fishera-Snedecora z zastosowaniem oprogramowania *Statistica* (wersja: 8.0, StatSoft, Inc., USA). Analizę statystyczną badań przeprowadzono ustalając liczbę powtórzeń $n = 3$ oraz poziom istotności $\alpha = 0,05$.



Rys. 2. Parametry i czynniki procesu szlifowania oraz toru pomiarowego
Fig. 2. The parameters and factors of grinding process and the measurement path

Przedstawiona metodyka pozwoliła dokonać oszacowania parametrów modeli liniowych i nieliniowych opisujących zmiany chropowatości powierzchni, wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej oraz składowej stycznej i normalnej siły szlifowania.

3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Badania istotności wpływu poszczególnych czynników wejściowych na czynnik wyjściowy przeprowadzono z użyciem analiz statystycznych, które odpowiadały zależnościom: $R_a = f(v_s, v_{ft}, a_e)$, $AE_{rms} = f(v_s, v_{ft}, a_e)$, $F_t = f(v_s, v_{ft}, a_e)$, oraz $F_n = f(v_s, v_{ft}, a_e)$. Statyczny plan badań, opracowany na podstawie prostokąta Youdena [8],[18] o wymiarach (poziomach czynników) $5 \times 5 \times 4$, utworzono wprowadzając listę wartości czynników wejściowych (tabela 1). Istotność czynników wejściowych procesu szlifowania określono przez porównanie oszacowanych wartości testu Fishera-Snedecora z wartością krytyczną testu $F_{kr}(\alpha, f_R, f_{A,B,C})$.

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 (AE_{rms} , F_t , F_n) oraz na chropowatość powierzchni obrabianej (R_a). Dla przyjętego zakresu zmienności parametrów, odrzucono natomiast hipotezę o istotności prędkości obwodowej ściernicy (v_s) na analizowane zmienne wyjściowe.

Stacyjny plan eksperymentów mających na celu ustalanie modeli dla chropowatości powierzchni obrabianej, siły szlifowania oraz wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej, zrealizowano jako plan pięciopoziomowy kompozycyjny rotabilny

(5LRotExp, 5 Levels Rotary Composite Experiment) [8], umożliwiając, tym samym, dokonanie identyfikacji badanych obiektów w postaci modeli nieliniowych (tabela 2).

Dobierając postać modelu matematycznego badanego obiektu na podstawie wyników eksperymentu, obliczono z użyciem programu *Experiment Planner* współczynniki równania regresji dobierając funkcję, która spełniała następujące warunki: posiadała formułę regresji adekwatną do danych (na podstawie testu F), charakteryzowała się jak najwyższą wartością współczynnika korelacji R , wykazała istotność poszczególnych parametrów modelu.

Tabela 1. Plan badań eksperymentalnych opracowany na podstawie prostokąta Youdena oraz istotność czynników wejściowych procesu szlifowania dla przyjętego zakresu zmienności parametrów
Table 1. The Plan of experimental studies developed of the basis of a Youden's rectangle and the statistical significance of grinding process input factors assumed for the range of parameters variability

Lp.	v_s , m/s	v_{ft} , m/min	a_e , mm	Lp.	v_s , m/s	v_{ft} , m/min	a_e , 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
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
Czynnik wejściowy	Ra	AE_{rms}	F_t	F_n	Wartość krytyczna F_{kr}	Istotność statystyczna	
	Wartość testu F Fishera-Snedecora dla $\alpha = 0,05$						
v_s	3,42	0,02	3,39	2,37	3,84	brak istotności	
v_{ft}	120,82	31,89	18,38	17,72	3,84	znaczący	
a_e	36,83	11,97	54,96	51,81	4,07	znaczący	

Tabela 2. Macierz czynników wejściowych w pięciopoziomowym kompozycyjnym rotatabilnym planie badań eksperymentalnych (wartości odkodowane)
Table 2. The matrix of the input factors in five levels rotary composite experiment (values decoded)

Nr eksper.	v_{ft} , m/min	a_e , mm	Nr eksper.	v_{ft} , m/min	a_e , 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			

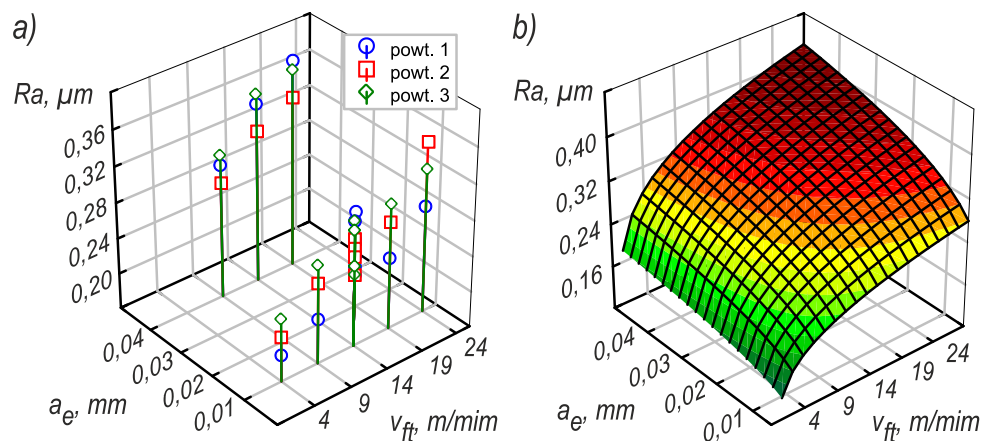
3.1. MODEL ZMIAN CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI

Wyniki pomiarów średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości powierzchni przedmiotów obrobionych (parametr Ra) w procesie obwodowego szlifowania

powierzchni płaskich w funkcji styku roboczego (a_e) i prędkości posuwu stycznego stołu (v_{ft}) przedstawiono na rys. 3a.

W wyniku aproksymacji funkcją potęgową (rys. 3b), otrzymano równanie regresji postaci nieliniowego modelu powierzchniowego, który z określonym błędem przybliża relację pomiędzy chropowatością powierzchni przedmiotu szlifowanego (Ra), a nastawami procesu wyrażonymi posuwem stycznym (v_{ft}) oraz głębokością szlifowania (a_e):

$$Ra = 0,3501 \cdot v_{ft}^{0,2163} \cdot a_e^{0,1804}. \quad (1)$$



Rys. 3. Wyniki badań doświadczalnych wpływu głębokości szlifowania (a_e) i prędkości posuwu stycznego stołu (v_{ft}) na chropowatość powierzchni przedmiotu obrabianego (Ra): a) punktowy wykres rozrzutu, b) model powierzchniowy aproksymowany funkcją potęgową

Fig. 3. The experimental results of the effect of working engagement (a_e) and the tangential table feed speed (v_{ft}) on the machined workpiece surface roughness (Ra): a) a scatter plot of dispersion, b) a surface model approximated by a power function

Współczynnik korelacji dla przyjętej formuły posiadał statystyczną istotność, osiągając wartość $R = 0,9836$, przy spełnieniu testu F: $F = 148,3786 \geq F_{kr} = 4,1$. Wszystkie współczynniki formuły regresji opisującej chropowatość powierzchni przedmiotu szlifowanego okazały się statystycznie istotne (tabela 3).

Tabela 3. Istotność współczynników formuły regresji dla chropowatości powierzchni
Table 3. The significance of coefficients of the regression formula for the surface roughness

Współczynnik	Wartość	Wartość rozkładu t-Studenta	Wartość krytyczna*	Istotność
(0)	0,3501	13,723	2,228	tak
A	0,2163	12,921	2,228	tak
B	0,1804	14,759	2,228	tak

* na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ i liczny stopni swobody $(N - 1) = 10$.

W tabeli 4 zamieszczono porównanie wyników pomiarów badań z obliczeniami dla modelu chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego wyrażonym parametrem Ra .

Tabela 4. Porównanie modelu z wynikami eksperymentu dla parametru Ra
 Table 4. The comparison of the model with the results of the experiment for Ra parameter

Numer eksper.	Średnia wartość z eksperymentu	Rezultat z modelu	Przedział ufności	Różnica wartości z eksperymentu i modelu	
	μm	μm	$\pm \mu\text{m}$	Bezwzględna, μm	Względna, %
1	0,2433	0,2454	0,0141	+ 0,0021	+ 0,9
2	0,2733	0,2884	0,0156	+ 0,0151	+ 5,5
3	0,3067	0,3151	0,0117	+ 0,0084	+ 2,7
4	0,3733	0,3704	0,0134	- 0,0029	- 0,8
5	0,3167	0,3034	0,0162	- 0,0133	- 4,2
6	0,2100	0,2059	0,0131	- 0,0041	- 2,0
7	0,3533	0,3467	0,0127	- 0,0066	- 1,9
8	0,2733	0,2700	0,0149	- 0,0033	- 1,2
9	0,2700	0,2700	0,0149	+ 0,0000	+ 0,0
10	0,2800	0,2700	0,0149	- 0,0100	- 3,6
11	0,2633	0,2700	0,0149	+ 0,0067	+ 2,5
12	0,2700	0,2700	0,0149	+ 0,0000	+ 0,0
13	0,2633	0,2700	0,0149	+ 0,0067	+ 2,5
Wartość średnia:				0,0061	2,14

Stopień dopasowania wyznaczonego modelu matematycznego równania regresji dla chropowości przedmiotu po szlifowaniu (wyrażonej parametrem Ra) można uznać za wystarczający, ponieważ spełniony został warunek istotności współczynnika korelacji wielowymiarowej, istotności współczynników formuły regresji, a średnia wartość błędu obliczona względem wyników eksperymentu jest względnie niewielka i wynosi 2,14% (co przekłada się na różnicę bezwzględną równą 0,0061 μm).

3.2. MODEL ZMIAN WARTOŚCI SKUTECZNEJ SYGNAŁU EMISJI AKUSTYCZNEJ

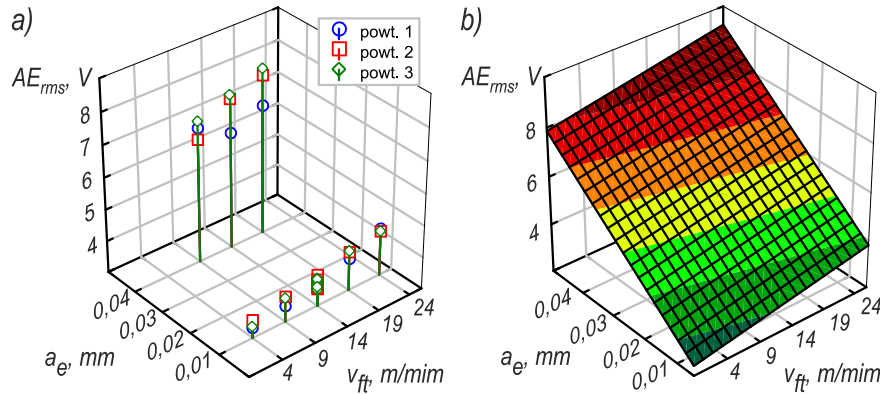
Wyniki pomiarów średniej wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej (AE_{rms}) rejestrowane w trakcie procesu obwodowego szlifowania powierzchni płaskich w funkcji głębokości szlifowania (a_e) oraz prędkości posuwu stycznego stołu (v_{ft}) przedstawiono na rys. 4a.

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

$$AE_{rms} = 1,8623 + 0,0514 \cdot v_{ft} + 120,991 \cdot a_e . \quad (2)$$

Współczynnik korelacji dla tej formuły posiadał statystyczną istotność, osiągając wartość $R = 0,998$, przy spełnieniu testu F: $F = 1243,9337 \geq F_{kr} = 4,1$. Postać graficzną modelu przedstawia rys. 4b.

Wszystkie współczynniki formuły regresji opisującej wartość skuteczną emisji akustycznej, rejestrowanej w trakcie procesu szlifowania, okazały się statystycznie istotne (tabela 5).



Rys. 4. Wyniki badań doświadczalnych wpływu styku roboczego (a_e) i prędkości posuwu stycznego stołu (v_{ft}) na wartość skuteczną sygnału AE (AE_{rms}): a) punktowy wykres rozrzutu, b) model powierzchniowy aproksymowany funkcją liniową

Fig. 4. The experimental results of the effect of working engagement (a_e) and the tangential table feed speed (v_{ft}) on root mean square value of acoustic emission (AE_{rms}): a) a scatter plot of dispersion, b) a surface model approximated by a power function

Tabela 5. Istotność współczynników formuły regresji dla wartości skutecznej sygnału AE
Table 5. The significance of coefficients of the regression formula for the root mean square value of AE signal

Współczynnik	Wartość	Wartość rozkładu t-Studenta	Wartość krytyczna	Istotność
(0)	1,8623	6,908	2,228	tak
A	0,0514	3,076	2,228	tak
B	120,9910	19,060	2,228	tak

Wyniki eksperymentów porównano z wynikami funkcji regresji, dokonując tym samym oceny jakości modelu. W tabeli 6 zestawiono wyniki tej analizy.

Tabela 6. Porównanie modelu z wynikami eksperymentu dla sygnału emisji akustycznej AE_{rms}
Table 6. The comparison of the model with the results of the experiment for acoustic emission signal AE_{rms}

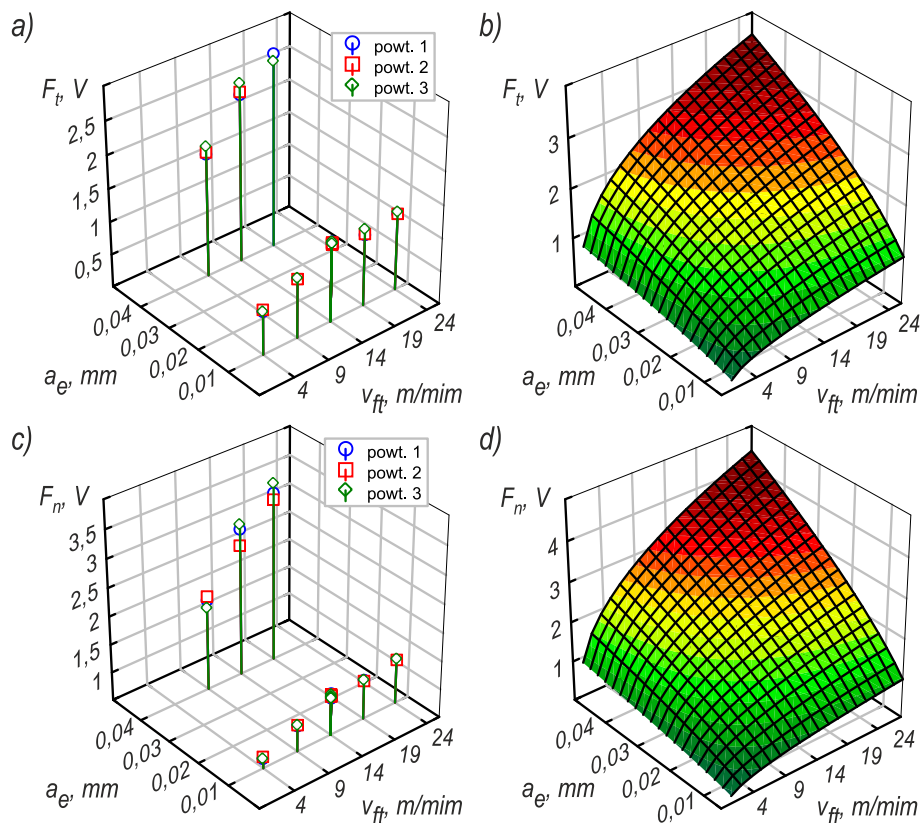
Numer eksper.	Średnia wartość z eksperymentu	Rezultat z modelu	Przedział ufności $\pm V$	Różnica wartości z eksperymentu i modelu	
	V	V		Bezwzględna, V	Względna, %
1	3,6674	3,5347	0,1226	- 0,1327	- 3,6
2	4,1579	4,0485	0,1226	- 0,1094	- 2,6
3	7,1554	7,1644	0,1289	+ 0,0090	+ 0,1
4	7,7429	7,6783	0,1289	- 0,0646	- 0,8
5	4,4172	4,3054	0,1294	- 0,1118	- 2,5
6	3,4146	3,2777	0,1294	- 0,1369	- 4,0
7	7,3657	7,4213	0,1267	+ 0,0556	+ 0,8
8	3,7992	3,7916	0,1202	- 0,0076	- 0,2
9	3,6500	3,7916	0,1202	+ 0,1416	+ 3,9
10	3,7395	3,7916	0,1202	+ 0,0521	+ 1,4
11	3,6732	3,7916	0,1202	+ 0,1184	+ 3,2
12	3,7376	3,7916	0,1202	+ 0,0540	+ 1,4
13	3,6593	3,7916	0,1202	+ 0,1323	+ 3,6
Wartość średnia:				0,0866	2,17

Stopień dopasowania wyznaczonego modelu matematycznego funkcji regresji dla wartości skutecznej AE można uznać za wystarczający, ponieważ spełniony został warunek istotności współczynnika korelacji wielowymiarowej, istotności współczynników formuły regresji, a wartość błędu 2,17%, obliczoną względem wyników eksperymentu, można uznać za bardzo małą. Oznacza to, że w trakcie badań eksperymentalnych należy oczekiwać, że rejestrowane wartości AE_{rms} będą różnić się średnio o 0,09 V od wartości oszacowanych na podstawie modelu.

3.3. MODEL ZMIAN SKŁADOWEJ STYCZNEJ ORAZ NORMALNEJ SIŁY SZLIFOWANIA

Chociaż jednostką siły jest Newton (N), to ze względu na specyfikę układu pomiarowego, odczyty wykonano w jednostkach napięcia (V). Tak też zdefiniowano modele, co jest wygodne do interpretacji wartości odczytywanych ze wzmacniacza ładunku. Zamiana na jednostkę mechaniczną wymaga przeliczenia zgodnie z zależnością:

$$F_{[N]} = \frac{Z_{F[N]}}{Z_{U[V]} \cdot SC} F_{out[V]}, \quad (3)$$



Rys. 5. Wykresy rozrzutu punktów z badań eksperymentalnych oraz model powierzchniowy dla: a-b) składowej stycznej siły szlifowania (F_t), c-d) składowej normalnej siły szlifowania (F_n)

Fig. 5. Scatter plots of points from experimental studies and surface model for: a-b) tangential component of grinding force (F_t), c-d) normal component of grinding force (F_n)

gdzie: Z_F – zakresy wartości analizowanej składowej siły szlifowania charakterystyczne dla wykorzystanego w badaniach siłomierza (5000 N dla składowej stycznej, 10000 N dla składowej normalnej), Z_U – zakresy wartości napięcia na wyjściu przetwornika analogowo-cyfrowego (20 V), SC – zastosowana skala w jednostkach mechanicznych (M.U.) na jeden wolt sygnału wyjściowego (w badaniach: 10 M.U./V), F_{out} – wartość składowej siły szlifowania zarejestrowana w jednostce napięcia.

Wyniki pomiarów średniej wartości składowej stycznej (F_t) oraz składowej normalnej (F_n) siły szlifowania, zarejestrowanych w trakcie procesu szlifowania, w funkcji styku roboczego (a_e) i prędkości posuwu stycznego stołu (v_{ft}) przedstawiono na rys. 5a i 5c.

W przypadku modeli statystycznych opisujących zmiany wartości obu składowych siły szlifowania, formuły regresji, które charakteryzowały się adekwatnością do danych, najwyższą wartością współczynnika korelacji R , a ich istotność była znacząca statystycznie, opisano funkcjami potęgowymi:

$$F_c = 5,6429 \cdot v_{ft}^{0,3847} \cdot a_e^{0,5709} \quad (4)$$

$$F_n = 7,8755 \cdot v_{ft}^{0,4118} \cdot a_e^{0,6534} \quad (5)$$

Współczynnik korelacji dla składowej stycznej posiadał statystyczną istotność osiągając wartość $R = 0,984$, przy spełnieniu testu F: $F = 154,4784 \geq F_{kr} = 4,1$. Natomiast dla składowej normalnej współczynnik korelacji osiągnął wartość 0,986, przy spełnieniu testu F: $F = 175,0947 \geq F_{kr} = 4,1$. Wszystkie współczynniki formuły regresji opisującej zarówno składową styczną, jak i składową normalną siły szlifowania, okazały się statystycznie istotne – tabela 7.

Tabela 7. Istotność współczynników formuły regresji dla modeli charakteryzujących składowe styczną i normalną siły szlifowania

Table 7. The significance of coefficients of the regression formulas for models of tangential and normal grinding force components

Współczynnik	Wartość	Wartość rozkładu t-Studenta	Wartość krytyczna	Istotność
Składowa styczna siły szlifowania (F_t)				
(0)	5,6429	128,021	2,228	tak
A	0,3847	13,287	2,228	tak
B	0,5709	27,043	2,228	tak
Składowa normalna siły szlifowania (F_n)				
(0)	7,8755	108,615	2,228	tak
A	0,4118	8,656	2,228	tak
B	0,6534	18,823	2,228	tak

Powierzchniowe wykresy funkcji regresji, opisujące zależność wartości oczekiwanych zmiennych (F_t , F_n) od zmiennych objaśniających (v_{ft} , a_e), zamieszczono na rys. 5b i 5d w zakresie ustalonym w trakcie tworzenia planu eksperymentu.

Ocenę jakości modeli regresji przeprowadzono ponownie przez użycie wyznaczonych funkcji (ang. *scoring*) do wyników pomiarów. W tabeli 8 zamieszczono porównanie wyników pomiarów z obliczeniami dla modelu składowej stycznej siły szlifowania (F_t).

Stopień dopasowania wyznaczonego modelu matematycznego funkcji regresji dla składowej stycznej siły szlifowania (F_t) można uznać za wystarczający, ponieważ spełniony został warunek istotności współczynnika korelacji wielowymiarowej, istotności współczynników formuły regresji, a wartość błędu obliczona względem wyników eksperymentu wynosiła 7,21%, co przekłada się na różnicę bezwzględną równą zaledwie 0,0986 V, co daje po przeliczeniu około 2,4 N.

Tabela 8. Porównanie modelu z wynikami eksperymentu dla składowej stycznej siły szlifowania F_t
Table 8. The comparison of the model with the results of the experiment for tangential component of grinding force F_t

Numer eksper.	Średnia wartość z eksperymentu	Rezultat z modelu	Przedział ufności	Różnica wartości z eksperymentu i modelu	
	V	V	± V	Bezwzględna, V	Względna, %
1	0,9055	0,9477	0,2072	+ 0,0422	+ 4,7
2	1,1152	1,2633	0,2293	+ 0,1481	+ 13,3
3	1,9075	2,0914	0,172	+ 0,1839	+ 9,6
4	2,9183	2,7879	0,1975	- 0,1304	- 4,5
5	1,1780	1,3821	0,2375	+ 0,2041	+ 17,3
6	0,6668	0,6937	0,1929	+ 0,0269	+ 4,0
7	2,5965	2,4789	0,1861	- 0,1176	- 4,5
8	1,1973	1,1233	0,2193	- 0,0740	- 6,2
9	1,1863	1,1233	0,2193	- 0,0630	- 5,3
10	1,1892	1,1233	0,2193	- 0,0659	- 5,5
11	1,2059	1,1233	0,2193	- 0,0826	- 6,8
12	1,1947	1,1233	0,2193	- 0,0714	- 6,0
13	1,1948	1,1233	0,2193	- 0,0715	- 6,0
Wartość średnia:				0,0986	7,21

Podobny rezultat otrzymano dla składowej normalnej siły szlifowania (F_n). W tym przypadku wartość błędu obliczona względem wyników eksperymentu wynosiła 5,36%, co przekłada się na różnicę bezwzględną równą 0,0951 V (około 4,75 N).

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Różne obciążenie ziaren aktywnych ściernicy w strefie szlifowania, wywołane doбором parametrów szlifowania, powodowało odmienną reakcję piezoelektrycznych czujników siły, emisji akustycznej oraz zmierzoną chropowatość powierzchni przedmiotów obrobionych. Zarejestrowane wyniki eksperymentów poddane obróbce statystycznej oraz utworzone modele regresyjne badanych obiektów wykazały, że istnieje statystycznie istotna zależność pomiędzy zmianami rejestrowanych sygnałów AE_{rms} , F_t i F_n , chropowatością powierzchni przedmiotu obrobionego (opisaną parametrem Ra), a zadanymi nastawami procesu szlifowania. Istotność zastosowanych wielkości wejściowych procesu obwodowego szlifowania powierzchni płaskich na rejestrowane wielkości wyjściowe procesu: F_t , F_n , AE_{rms} , Ra wykazała, że prędkość obwodowa ściernicy (v_s) jest statystycznie nieistotna dla

przyjętego zakresu zmienności parametrów procesu, co oznacza, że w niektórych przypadkach może zostać pominięta przy ustalaniu warunków procesu obróbki.

Dzięki przeprowadzonym badaniom opracowano modele regresji, które w pierwszej kolejności pozwalają na wybór optymalnych parametrów kinematycznych procesu szlifowania ze względu na wartość składowych siły oraz emisję fal naprężeń występujących w strefie obróbki, jak i uzyskiwaną jakość (chropowatość) powierzchni przedmiotu. Przedstawione funkcje regresji mogą posłużyć, jako wskaźnik w teoretyczno-analitycznych pracach badawczych, w których opracowuje się modele symulacyjne procesu mikro-skrawania oraz szlifowania. Wyznaczone modele regresyjne mogą być również wykorzystane do ciągłej lub stopniowej zmiany parametrów obróbki, w celu utrzymania procesu w optymalnym obszarze warunków szlifowania i uniknięcia ewentualnych defektów termicznych powierzchni przedmiotu obrobionego lub uzyskania zakładanej dokładności i powtarzalności obróbki.

Dalsze badania, rozszerzające istotność zaprezentowanego modelu, w tym uwzględnienie prędkości obwodowej ściernicy, pozwolą ustalić postać uniwersalną funkcji regresji i wprowadzić taki model do nadzorowania procesu w trakcie jego trwania. Jednym z nowoczesnych trendów rozwojowych jest również tworzenie modeli w czasie rzeczywistym, co przedstawia Burek, et al., w artykułach [2],[3]. Modele takie pozwolą w czasie rzeczywistym optymalizować dobór parametrów obróbki.

LITERATURA

- [1] AHRENS M., FISCHER R., 2013, *Abrasion monitoring and automatic chatter detection in cylindrical plunge grinding*, Procedia CIRP, 8, 374-378.
- [2] BUREK J., BABIARZ R., ŻYŁKA Ł., 2013, *Nadzorowanie procesu szlifowania wglębnego z wykorzystaniem sygnału emisji akustycznej*, Mechanik, 86/8-9, 66-76.
- [3] BUREK J., BABIARZ R., 2012, *Regulacja adaptacyjna procesu szlifowania z wykorzystaniem sygnału emisji akustycznej*, Mechanik, 85/11, 918-925.
- [4] HASSUI A., DINIZ A.E., 2003, *Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel*, Int J Mach Tool Manu, 43/8, 855-862.
- [5] INASAKI I., KARPUSCHEWSKI B., LEE H-S., 2001, *Grinding chatter - origin and suppression*, CIRP Ann-Manuf Techn, 50/2, 515-534.
- [6] JEMIELNIAK K., 2012, *Automatyczna diagnostyka ostrzy narzędzi skrawających*, Inżynieria Maszyn, 17/1, 17-29.
- [7] KAMELY M.A., KAMIL S.M., CHONG C.W., 2011, *Mathematical modeling of surface roughness in surface grinding operation*, Int J Chem Mol Nucl Mater Metall Eng, 5/8, 704-707.
- [8] KUKIEŁKA S., 2002, *Experiment Planner 1.0-komputerowy program planowania eksperymentów rozpoznawczych i właściwych oraz identyfikacji i analizy modelu matematycznego obiektu badań*, Praca magisterska, Politechnika Koszalińska Wydział Mechaniczny, Koszalin.
- [9] LAJMERT P., 2010, *An application of Hilbert-Huang transform and principal component analysis for diagnostics of cylindrical plunge grinding process*, J Mach Eng, 10/1, 39-49.
- [10] LEŻAŃSKI P., LAJMERT P., 1998, *Przydatność sygnału emisji akustycznej w diagnostyce szlifowania wglębnego*, Inżynieria Maszyn, 3/4, 111-121.
- [11] LEŻAŃSKI P., 2010, *Ocena przydatności wybranych wielkości procesowych do nadzorowania stanu procesu szlifowania wglębnego*, Inżynieria Maszyn, 15/4, 95-112.
- [12] MCLEAY T., TURNER M.S., 2011, *Failure mode analysis to define process monitoring systems*, J Mach Eng, 11/4, 118-129.
- [13] OBORSKI P., 2015, *Integration of advanced monitoring in manufacturing systems*, J Mach Eng, 15/2, 55-68.
- [14] OCZOŚ K., PORZYCKI J., 1986, *Szlifowanie. Podstawy i technika*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, ISBN 83-204-0771-0.
- [15] PATNAIK DURGUMAHANTI U.S., SINGH V., VENKATESWARA RAO, P., 2010, *A New model for grinding force prediction and analysis*, Int J Mach Tool Manu, 50/3, 231-240.
- [16] SETTINERI L., KUMAR MISHRA V., SALONITIS K., 2013, *Empirical estimation of grinding specific forces and energy based on a modified Werner grinding model*, Procedia CIRP, 8, 287-292.

- [17] SHAMOTO E., RAUSCH S., ODENDAHL S., KERSTING P., BIERMANN D., ZABEL A., 2012, *Simulation-based prediction of process forces for grinding free-formed surfaces on machining centers*, Procedia CIRP, 4, 161-165.
- [18] STREET A.P., 1987, *Combinatorics of experimental design*, Oxford University Press.
- [19] SUTOWSKI P., 2009, *Wykorzystanie wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej oraz metod sztucznej inteligencji do oceny zużycia ściernicy*, Pomiary Automatyka Kontrola, 55/4, 255-258.
- [20] SUTOWSKI P., 2012, *Surface evaluation during the grinding process using acoustic emission signal*, J Mach Eng, 12/4, 23-34.
- [21] TANG J., DU J., CHEN Y., 2009, *Modeling and experimental study of grinding forces in surface grinding*, J Mater Process Tech, 209/6, 2847-2854.

EMPIRICAL ESTIMATION OF SURFACE ROUGHNESS AS WELL AS FORCE COMPONENTS AND ACOUSTIC EMISSION SIGNAL IN THE PROCESS OF FLAT SURFACE GRINDING

The article presents the empirical models of selected output parameters of the flat surface grinding process of steel NC10 with the use of grinding wheels with electrocorundum grains 99A. Two-parameter regression models were developed for: surface roughness, grinding force components and acoustic emission signal. These models allow to select the optimal parameters of the grinding process due to the value of the force and emission of the stress waves in the grinding zone and to obtain assumed surface quality of workpiece. These functions can be also used to verify simulation models or to avoid any thermal defects on machined surface or to obtain the assumed accuracy and repeatability processing.

Keywords: *statistical models, surface roughness, grinding force components, acoustic emission*