

LOGISTYKA - NAUKA

planowanie eksperymentu, obróbka poprzedzająca, toczenie, model cybernetyczny,
obróbka nagniataniem, jakość technologiczna wyrobu,
model matematyczny, funkcja regresji

KUŁAKOWSKA Agnieszka¹
PATYK Radosław²

ANALIZA WPLYWU WYBRANYCH PARAMETRÓW TOCZENIA NA JAKOŚĆ NAGNIATANYCH CZĘŚCI SAMOCHODOWYCH

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych wpływu wybranych parametrów toczenia na jakość nagniatanych części samochodowych. Badano wpływ następujących parametrów: $\bar{r}$ - promienia zaokrąglenia ostrza noża, $\bar{\epsilon}$ - kąta wierzchołkowego ostrza noża, $\bar{f}$ - posuwu toczenia, $\bar{v}$ - prędkości toczenia na parametr chropowatości Rz. Przygotowano toczeniem próbki ze stali C45 zgodnie z pięciopoziomowym rotabilnym planem eksperymentu. Próbki następnie nagniatano na głębokość $a_n=0,5$ Rz oraz wykonano pomiary. Otrzymane wyniki opracowano wykorzystując aparat statystyczno-matematyczny. Uzyskano funkcję regresji określającą wpływ wskazanych parametrów toczenia na chropowatość Rz powierzchni po procesie nagniatania naporowego tocznego.

ANALYSIS OF THE CHOSEN TURNING PARAMETERS INFLUENCE ON THE BURNISHED CAR PARTS QUALITY

In the paper results of experimental researches of the chosen turning parameters influence on the burnished car parts quality are presented. The investigation was about parameters: $\bar{r}$ - rounding radius of the tool edge, $\bar{\epsilon}$ - vertical angle of the tool edge, $\bar{f}$ - turning feed, $\bar{v}$ - turning velocity on the roughness parameter Rz. The samples from steel C45 according to five-level rotatable experiment plan were prepared. Next, the samples were burnished on the burnishing depth $a_n=0,5$ Rz and the measurements were carry out. The received results using statistical-mathematical apparatus were elaborated. One received regression function determining influence of indicated turning parameters on the roughness parameter Rz of the surface after burnishing rolling process of the car parts.

1. WSTĘP

Obróbka nagniataniem jest jedną z metod obróbki wykańczającej metali i ich stopów, spieków oraz tworzyw sztucznych, polegającą na wykorzystaniu miejscowego

¹Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny; 75-620 Koszalin; ul. Raclawicka 15-17.
Tel: + 48 94 347-82-01, E-mail: agnieszka.kulakowska@tu.koszalin.pl

²Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny; 75-620 Koszalin; ul. Raclawicka 15-17.
Tel: + 48 94 347-82-01, E-mail: radoslaw.patyk@tu.koszalin.pl

odkształcenia plastycznego, wytwarzanego w warstwie wierzchniej przedmiotu [1], wskutek określonego (siłowego oraz kinematycznego) współdziałania twardego i gładkiego narzędzia (o kształcie kuli, krążka, wałka lub innym) z powierzchnią obrabianą [1]. Niektóre sposoby obróbki nagniataniem mogą być stosowane w celu wytworzenia mikrorowków smarnych na powierzchniach współpracujących w warunkach tarcia, np.: czopów, panewek, prowadnic, cylindrów, tłoków, sprawdzianów i in., w celu podwyższenia ich odporności na zatarcie i zużycie ściernie. Wymagania stawiane stanom warstwy wierzchniej części samochodowych i dokładności wymiarowo-kształtowej są zróżnicowane, co związane jest to z różnorodnością ich warunków ich eksploatacji i przeznaczenia.

Autor w pracach [2, 3] badał wpływ 7 czynników wejściowych na parametry chropowatości Ra i Rz. Do badań wykorzystał dwupoziomowy plan eksperymentu. Model matematyczny opracowano w postaci funkcji potęgowej. W pracach tych badano wpływ wybranych parametrów realizacji procesu toczenia jak: posuw toczenia f , głębokość a oraz obroty wrzeciona tokarki n i średnica próbki d , kąt wierzchołkowy ostrza narzędzia ε , jego promień zaokrąglenia r , twardość materiału HB, na parametry chropowatości Ra i Rz.

W pracy [4] wykorzystano plan pięciopoziomowy rotabilny, zaś funkcja regresji opisująca wpływ: posuwu toczenia f , obrotów wrzeciona tokarki n , kąta wierzchołkowego ostrza narzędzia ε i jego promień zaokrąglenia r na parametr chropowatości Ra przedstawiona została w postaci wielomianu algebraicznego drugiego stopnia z interakcjami. Próbkę przygotowano ze stali C45 (HB=227,5) ze stałą średnicą ($d=24,5\text{mm}$), zaś głębokość toczenia obliczono na podstawie geometrii narzędzia wykorzystanego w czasie toczenia (ε , r) i posuwu f . Zwiększono zakresy czynników wejściowych, co umożliwiło zwiększenie dokładności opisu matematycznego badanego obiektu.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych wpływu wybranych parametrów toczenia na jakość nagniatanych części samochodowych. Badano wpływ następujących parametrów: $\bar{r}$ - promienia zaokrąglenia ostrza noża, $\bar{\varepsilon}$ - kąta wierzchołkowego ostrza noża, $\bar{f}$ - posuwu toczenia, $\bar{v}$ - prędkości toczenia na parametr chropowatości Rz. Przygotowano toczeniem próbki ze stali C45 zgodnie z pięciopoziomowym rotabilnym planem eksperymentu. Próbkę następnie nagniatano na głębokość $a_n=0,5$ Rz oraz wykonano pomiary. Otrzymane wyniki opracowano wykorzystując aparat statystyczno-matematyczny. Uzyskano funkcję regresji określającą wpływ wskazanych parametrów toczenia na chropowatość Rz powierzchni po procesie nagniatania naporowego tocznego.

2. IDENTYFIKACJA OBIEKTU BADAŃ

2.1. Opis badania

W badaniach poszukiwana jest postać równania regresji opisująca wpływ wybranych parametrów chropowatości powierzchni po toczeniu, jako obróbce poprzedzającej, na jakość chropowatości powierzchni po nagniataniu.

$$R_z = R_z(\bar{r}, \bar{\varepsilon}, \bar{f}, \bar{v}) \quad (1)$$

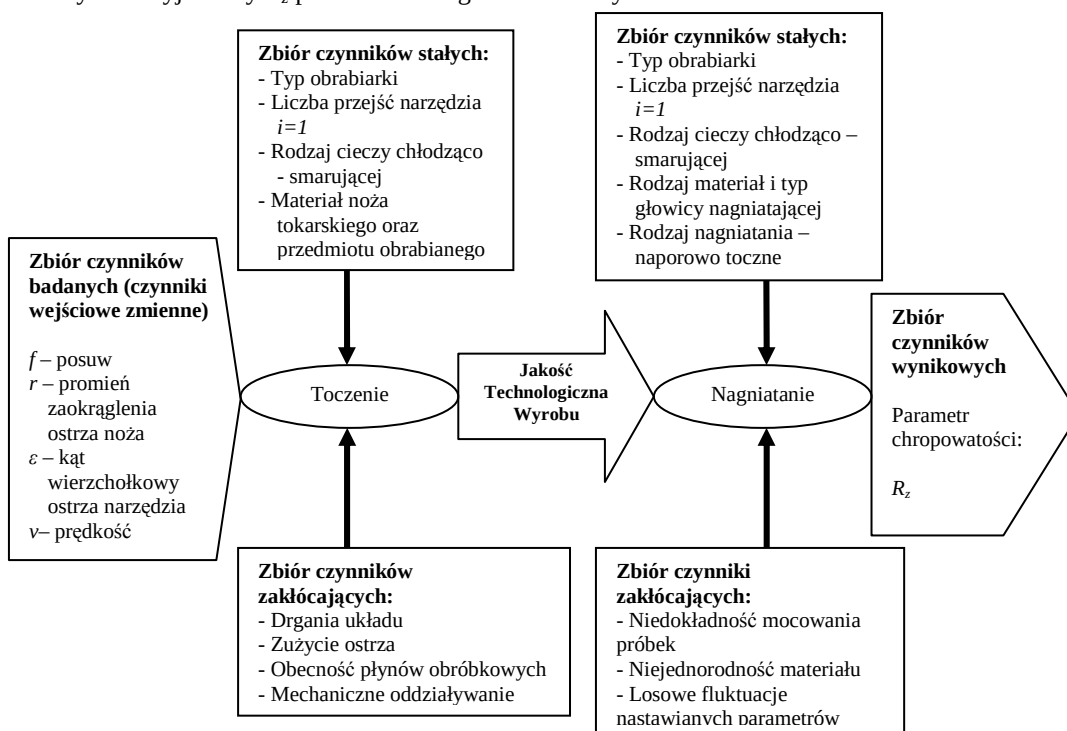
gdzie:

$\bar{r}$ - promień zaokrąglenia ostrza noża, $\bar{\varepsilon}$ - kąt wierzchołkowy ostrza noża, $\bar{f}$ - posuw toczenia, $\bar{v}$ - prędkość toczenia.

Do analizy otrzymanych wyników zastosowano nowoczesne metody planowania eksperymentu i metody statystycznego opracowania wyników.

2.2. Określenie zbiorów czynników, przedziały zmienności, model matematyczny, normowanie

Określenie zbioru czynników wejściowych, stałych, zakłócających mających wpływ na czynnik wyjściowy R_z przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Obiekt cybernetyczny obiektu badań

Przyjęty obszar badań w rozpatrywanym przypadku dla czynników wejściowych wynosi: kąt wierzchołkowy ostrza narzędzia $\varepsilon = 60^\circ \div 120^\circ$, posuw $f = 0,2 \div 1$ [mm/obr], promień zaokrąglenia ostrza $r = 0 \div 0,2$ [mm], prędkość toczenia $v = 7 \div 35$ [mm/s].

Zależność chropowatości powierzchni przedmiotu od wybranych warunków obróbki poprzedzającej (toczenie) opisano równaniem regresji w postaci wielomianu algebraicznego liniowo-kwadratowego z podwójnymi interakcjami w postaci ogólnej [5]:

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^S b_i \bar{x}_i + \sum_{i=1}^S b_{ii} \bar{x}_i^2 + \sum_{i,j=1}^S b_{ij} \bar{x}_i \bar{x}_j + \sum_{i,j,\dots,l,n=1}^S b_{ij\dots ln} \bar{x}_i \bar{x}_j \dots \bar{x}_l \bar{x}_n \quad (2)$$

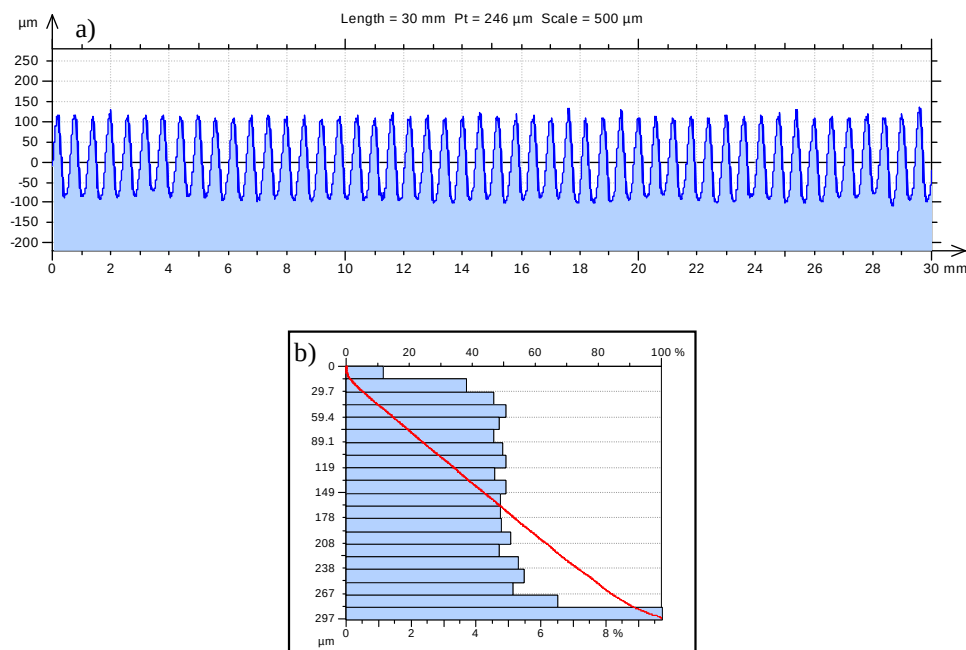
gdzie:

$\hat{Y}$ - wielkość wyjściowa,
 b - nieznane współczynniki
 S - liczba zmiennych wejściowych obiektu badań,
 x - wielkości wejściowe.

Wprowadzenie normowania ma na celu uproszczenie zapisu wzorów oraz obliczeń w procesie identyfikacji. Sposób kodowania zmiennych wejściowych zależy od postaci modelu matematycznego badanego obiektu. Na rysunku 2 przedstawiono tabelę z wartościami rzeczywistymi czynników wejściowych oraz w postaci zakodowanej.

Coded experiment design matrix						Uncoded experiment design matrix (settable values)					
No	k	f	r	v		No	k	f	r	v	
	[stopnie]	[mm/obr]	[mm]	[m/min]			[stopnie]	[mm/obr]	[mm]	[m/min]	
	A	B	C	D			A	B	C	D	
1	-	-	-	-		1	75	0.4	0.05	14	
2	+	-	-	-		2	105	0.4	0.05	14	
3	-	+	-	-		3	75	0.8	0.05	14	
4	+	+	-	-		4	105	0.8	0.05	14	
5	-	-	+	-		5	75	0.4	0.15	14	
6	+	-	+	-		6	105	0.4	0.15	14	
7	-	+	+	-		7	75	0.8	0.15	14	
8	+	+	+	-		8	105	0.8	0.15	14	
9	-	-	-	+		9	75	0.4	0.05	28	
10	+	-	-	+		10	105	0.4	0.05	28	
11	-	+	-	+		11	75	0.8	0.05	28	
12	+	+	-	+		12	105	0.8	0.05	28	
13	-	-	+	+		13	75	0.4	0.15	28	
14	+	-	+	+		14	105	0.4	0.15	28	
15	-	+	+	+		15	75	0.8	0.15	28	
16	+	+	+	+		16	105	0.8	0.15	28	
17	+2	0	0	0		17	120	0.6	0.1	21	
18	-2	0	0	0		18	60	0.6	0.1	21	
19	0	+2	0	0		19	90	1	0.1	21	
20	0	-2	0	0		20	90	0.2	0.1	21	
21	0	0	+2	0		21	90	0.6	0.2	21	
22	0	0	-2	0		22	90	0.6	0	21	
23	0	0	0	+2		23	90	0.6	0.1	35	
24	0	0	0	-2		24	90	0.6	0.1	7	
25	0	0	0	0		25	90	0.6	0.1	21	
26	0	0	0	0		26	90	0.6	0.1	21	
27	0	0	0	0		27	90	0.6	0.1	21	
28	0	0	0	0		28	90	0.6	0.1	21	
29	0	0	0	0		29	90	0.6	0.1	21	
30	0	0	0	0		30	90	0.6	0.1	21	
31	0	0	0	0		31	90	0.6	0.1	21	

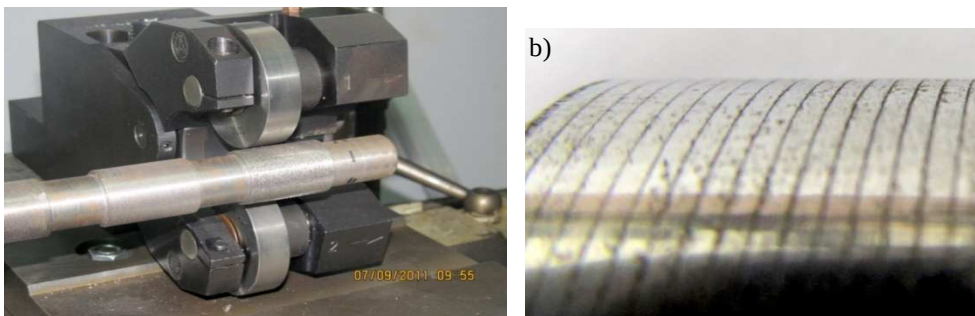
Rys. 2. Wartości rzeczywiste i kodowane badanego parametru



Rys. 5. Profilograf powierzchni toczonej (a), udział nośny liniowy (b)

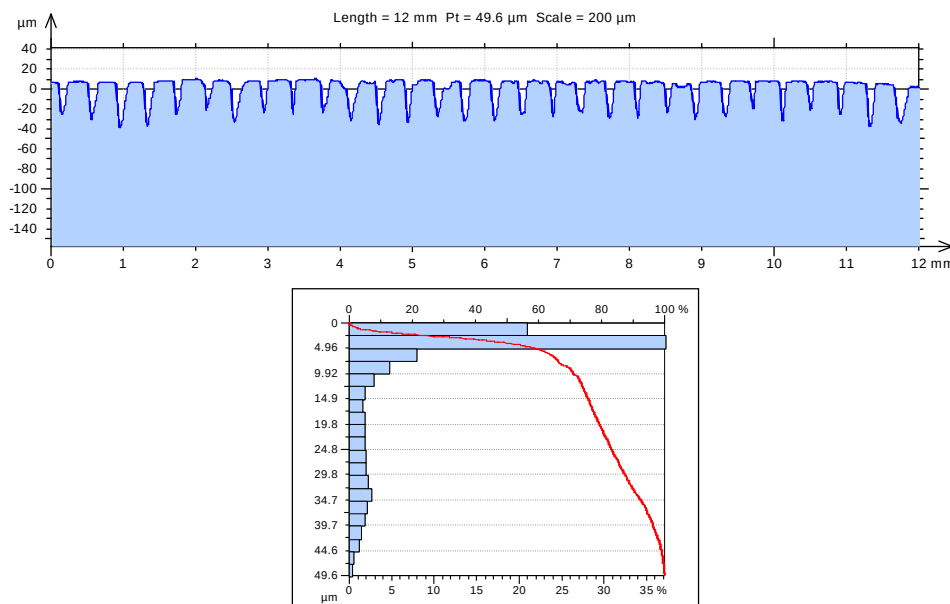
3.2. Nagniatanie

Nagniatanie naporowo–toczne przeprowadzono na powierzchniach wcześniej przygotowanych wałków (rys. 4). Do badań wykorzystano stanowisko na bazie tokarki TUB-32, na której zamontowano głowicę dwurolkową firmy Fette T27R-G08-14A (rys. 6a). Głębokość nagniatania a_n ustalono dla każdej próbki oddzielnie, tak, aby spełnić zależność $a_n = 0,5R_z$. Próbki walcowe nagniatano przy obrotach wrzeciona tokarki $n = 280$ [obr/min]. Widok próbki po nagniataniu przedstawiono na rysunku 6 b.



Rys. 6. Głowica nagniatająca firmy Fette (a) i widok powierzchni po nagniataniu (b).

Na rysunku 7 przedstawiono: przykładowy profil chropowatości powierzchni po nagniataniu (a) i jej udział nośny liniowy (b).



Rys. 7. Profilograf powierzchni nagniatanej(a), udział nośny liniowy (b)

4. WYNIKI BADAŃ

4.1. Analiza statystyczna

W celu wyeliminowania wyników pomiarów obarczonych błędem grubym zastosowano odpowiednie statystyki: Grubbsa B_6^+ oraz B_6^- . Stwierdzono, że nie ma podstaw do odrzucenia minimalnych oraz maksymalnych wartości otrzymanych dla poszczególnych punktów planu eksperymentu. Następnie obliczono wariancję międzywierszową oraz sprawdzono jednorodność wariancji w próbie za pomocą testu Cochra. Stwierdzono, że należy przyjąć hipotezę o jednorodności wariancji w próbie.

Funkcja regresji opisująca proces nagniatania powierzchni przygotowanej w procesie toczenia, jako obróbce poprzedzającej, uwzględniająca wpływ posuwu f , kąta wierzchołkowego ostrza noża ε , promienia zaokrąglenia ostrza r oraz prędkości tocznia na parametr chropowatości powierzchni Rz ma postać:

$$\begin{aligned}
 Rz = & 549,45 - 7,58 \cdot k + 59,3 \cdot f - 375,08 \cdot r - 11,85 \cdot v - 3,52 \cdot k \cdot f - 3,06 \cdot k \cdot r + \\
 & + 0,046 \cdot k \cdot v + 792,5 \cdot f \cdot r + 0,66 \cdot f \cdot v - 10,96 \cdot r \cdot v + 0,041 \cdot k^2 + 233,02 \cdot f^2 + \\
 & + 1973,33 \cdot r^2 + 0,194 \cdot v^2
 \end{aligned} \quad (3)$$

Analizę statystyczną funkcji regresji wykonano za pomocą testu t Studenta. Wykorzystano następujący schemat:

- obliczenie wariancji międzywierszowej w centrum programu,
- obliczenie wariancji współczynnika regresji,
- obliczenie odchylenia standardowego współczynników regresji,
- statystyki obliczeniowe t Studenta.

Ponieważ w naszym przypadku wartości t Studenta są większe od wartości krytycznych, a więc współczynniki regresji mają istotny wpływ na czynnik wynikowy i równanie regresji przyjmuje postać jak podano we wzorze 3.

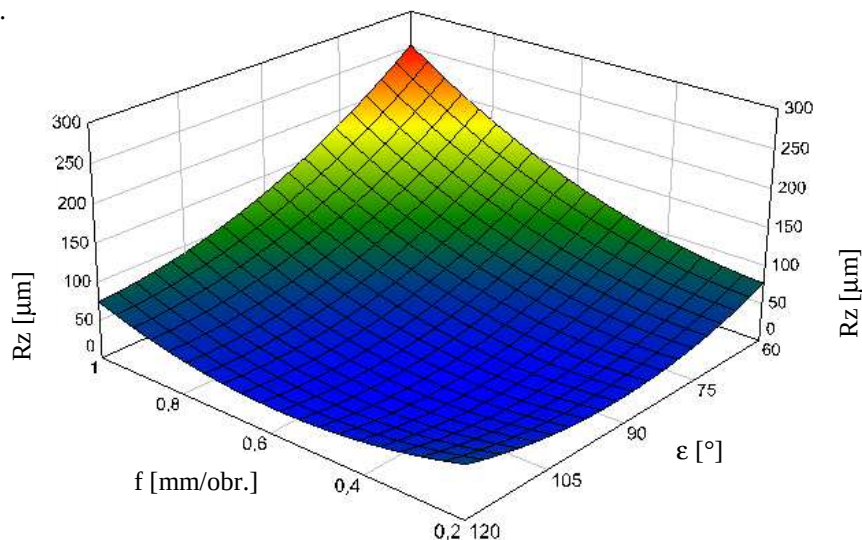
Miarą stopnia dopasowania otrzymanych wyników w postaci równania regresji do wyników eksperymentu jest badanie współczynnika korelacji wielowymiarowej, który wynosi:

$$R=0,9185 \quad (4)$$

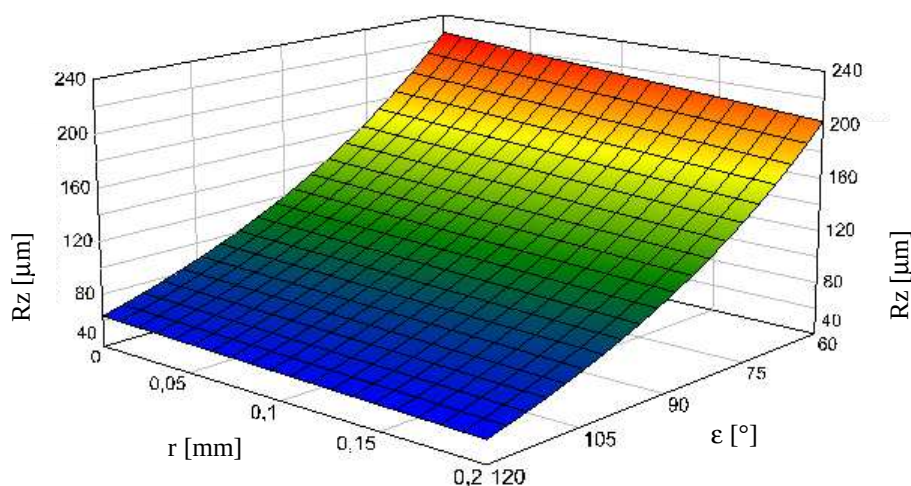
Istotność otrzymanego współczynnika korelacji wielowymiarowej sprawdzono wykorzystując test F Snedecora. Stwierdzono, że nie ma podstawy do odrzucenia hipotezy o istotności współczynnika korelacji wielowymiarowej. Ocenę adekwatności modelu matematycznego do obiektu rzeczywistego sprawdzono testem F, przy poziomie istotności $\alpha=0,05$.

4.2. Graficzna prezentacja wyników

Na podstawie uzyskanej funkcji regresji sporządzono wykresy zależności parametru chropowatości powierzchni R_z po nagniataniu od posuwu toczenia i kąta wierzchołkowego ostrza noża (rys. 8) oraz kąta wierzchołkowego ostrza noża i jego promienia zaokrąglenia (rys. 9).



Rys. 8. Zależność parametru chropowatości R_z po nagniataniu od kąta wierzchołkowego ostrza noża i posuwu toczenia



Rys. 9. Zależność parametru chropowatości R_z po nagniataniu od kąta wierzchołkowego ostrza noża i jego promienia zaokrąglenia

5. WNIOSKI

Zły stan przedmiotu po obróbce poprzedzającej jest przyczyną zmian jakości technologicznej wyrobu po nagniataniu. Poprawiana jest jedynie chropowatość powierzchni poprzez jej zmniejszenie oraz zwiększenie udziału nośnego liniowego. Zwiększa się umocnienie i utwardzenie materiału w warstwie wierzchniej w jednakowym takim samym stopniu dla każdej z poszczególnych nierówności.

Po analizie uzyskanych wyników można stwierdzić, że na znaczny wpływ na chropowatość powierzchni po nagniataniu wpływ mają takie parametry jak: kąt wierzchołkowy ostrza narzędzia, posuw, promień zaokrąglenia ostrza narzędzia oraz prędkość toczenia. Im większy jest kąt wierzchołkowy ostrza noża, tym chropowatość powierzchni się zmniejsza. W przypadku posuwu - im jest on większy tym chropowatość powierzchni się zwiększa.

W powyższej pracy opracowano model matematyczny, statystyczno-doświadczalny procesu nagniatania. Przeanalizowano dopasowanie różnych wyników modeli matematycznych. Wybrano model nierówności algebraicznej liniowo-kwadratowy z podwójnymi interakcjami. Współczynnik korelacji wielowymiarowej dla tego modelu wyniósł $R=0,9185$.

Uzyskana funkcja regresji może być wykorzystywana do dalszych analiz i optymalizacji.

Badania eksperymentalne potwierdziły istotność wpływu warunków toczenia na jakość technologiczną wyrobu nagniatanego. Parametry profilu chropowatości po nagniataniu zależą od warunków toczenia, tj. geometrii ostrza noża (promienia zaokrąglenia $\bar{r}$ i kąta wierzchołkowego $\bar{\epsilon}$) i parametrów technologicznych (posuw toczenia $\bar{f}$ i v - prędkości).

Opracowane równania regresji postaci $\hat{Y} = \hat{Y}(\bar{r}, \bar{\varepsilon}, \bar{f}, \bar{v})$, pozwalają określić wartości parametrów profilu chropowatości (Ra , Rz , R_{max} , Rt , Rz_{ISO} , Rp , R_{sm}) i falistość Wt w zależności od warunków toczenia lub określać optymalne warunki procesu toczenia ze względu na ekstremalne wartości parametrów profilu chropowatości powierzchni po nagniataniu.

Otrzymane wyniki mają istotne znaczenie dla sterowania właściwościami kształtowanej warstwy wierzchniej w procesie nagniatania naporowego tocznego, gdyż stwarzają możliwość skutecznej ingerencji w projektowanie procesu technologicznego i dostosowanie jakości technologicznej do odpowiednich warunków eksploatacyjnych przedmiotu.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Przybylski W.: *Technologia obróbki nagniataniem*, Warszawa, WNT 1987.
- [2] Kułakowska A., Kukielka L.: *Problematyka przygotowania powierzchni w procesie toczenia w aspekcie jakości technologicznej wyrobu nagniatanego*, PAK, vol. 54, nr 7/2008.
- [3] Kułakowska A., Kukielka L.: *Wpływ warunków obróbki toczeniem na parametr chropowatości Ra wyrobu nagniatanego*, Logistyka, nr 3/2009, (2009).
- [4] Kułakowska A.: *Problems of surface preparation under Burnishing rolling in aspect of product quality*, Steel Research International Special Edition, Volume 81, Number 9, Publishing Company Verlag Stahleisen 2010.
- [5] Kukielka L.: *Podstawy badań inżynierskich*, WNT, Warszawa 2002.