

*frezowanie czołowe, parametry skrawania, minimalna grubość warstwy skrawanej, przemieszczenia względne w układzie narzędzie przedmiot obrabiany*  
*face milling, machining parameters, the minimum thickness of the cut layer, the relative displacement in the system tool workpiece*

Łukasz NOWAKOWSKI<sup>1</sup>  
Edward MIKO<sup>2</sup>  
Piotr MAJ<sup>3</sup>

## ANALIZA PROCESU FREZOWANIA STALI NC6

W pracy przedstawiono wyniki analizy procesu frezowania czołowego stali NC6 głowicą walcowo-czołową oraz jego wpływ na chropowatość powierzchni. Podczas prób skrawania zmierzono przemieszczenia względne w układzie narzędzie przedmiot obrabiany, wyznaczono wartości minimalnej grubości warstwy skrawanej. Wyznaczony został wpływ posuwu i prędkości skrawania na wartość parametru minimalnej grubości warstwy skrawanej oraz przemieszczeń względnych w układzie narzędzie przedmiot obrabiany.

## THE MILLING PROCESS ANALYSIS OF NC6 STEEL

The paper shown the results of the analysis NC6 steel face milling process using square shoulder mill and its influence on the surface roughness. During the cutting tests the relative displacement in the system tool-workpiece were measured, also the minimum thickness of the cut layer were determined. Was designated the impact of feed rate and cutting speed on the value of the minimum thickness of the cut layer and the relative displacements in the system tool-workpiece.

### 1. WSTĘP

Proces frezowania czołowego narzędziami wielostrzowymi z dużymi prędkościami skrawania i dużym posuwem na ostrze przy małych naddatkach obróbkowych umożliwia wysoko wydajną obróbkę płaszczyzn oraz zapewnia wysoką jakość powierzchni. Skutkuje to tym, że coraz częściej powierzchnie obrobione tymi sposobami nie podlegają już dalszemu wykończeniu i bezpośrednio wpływają na właściwości eksploatacyjne wyrobu [7]. Wynikiem obróbki przedmiotu podczas frezowania czołowego głowicą frezową jest tworzenie się powierzchni o określonej chropowatości. Wynik tego procesu jest trudny do przewidzenia, ponieważ na jego przebieg wpływa wiele czynników, które towarzyszą procesowi usuwania materiału [2]. W rzeczywistych warunkach ostrza głowicy frezarskiej nie są idealnie ustawione, również krawędź skrawająca płytki, posiada pewne ślady zużycia oraz ma zaokrągloną krawędź skrawającą o promieniu  $r_n$  wynikającą z technologii jej wykonania oraz zużycia wpływającą na parametr minimalnej grubości warstwy skrawanej ( $h_{min}$ ). Podczas obróbki dokładnej istotne jest uwzględnienie bicia poosiowego i promieniowego oraz rzeczywistego kształtu ostrzy skrawających [3].

Przemieszczenia względne w układzie narzędzie – przedmiot obrabiany (N–PO) powstające podczas procesu skrawania są zjawiskiem niekorzystnym i nieporządnym [4, 5]. Wpływają one na spadek opłacalności procesu wytwarzania, powodując obniżenie trwałości narzędzi i podzespołów obrabiarki, stanowią również podstawowe utrudnienia w podnoszeniu wydajności procesu skrawania, oraz w istotny sposób oddziałują na strukturę geometryczną powierzchni obrobionej [5,6].

W pracy przedstawiono wyniki badań, analizy wpływu posuwu i prędkości skrawania na przebieg procesu frezowania czołowego. Podczas badań brano pod uwagę następujące czynniki: błąd posadowienia płytek skrawających w korpusie narzędzia, liczbę ostrzy skrawających, przemieszczenia w układzie narzędzie – przedmiot obrabiany oraz wartość minimalnej grubości warstwy skrawanej.

<sup>1</sup> Łukasz Nowakowski, dr inż. Politechnika Świętokrzyska, Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii, Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25314 Kielce, e-mail: lukasn@tu.kielce.pl

<sup>2</sup> Edward Miko, dr hab. inż. prof. PŚk. – Politechnika Świętokrzyska, Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii, Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25314 Kielce, e-mail: emiko@tu.kielce.pl

<sup>3</sup> Piotr Maj, mgr inż. – Politechnika Świętokrzyska, Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii, Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25314 Kielce, e-mail: pmaj@tu.kielce.pl

## 2. METODYKA BADAŃ

Celem przeprowadzonych badań, było określenie wpływu prędkości skrawania i posuwu na ostrze na minimalną grubość warstwy skrawanej ( $h_{\min}$ ) oraz przemieszczenia względne w układzie narzędzie – przedmiot obrabiany podczas frezowania czołowego stali NC6.

Na podstawie studiów literaturowych i dotychczasowych badań własnych uznano, że najodpowiedniejszym programem badań doświadczalnych jest program statyczny zdeterminowany selekcyjny jednoczynnikowy PS/DS-U [1, 12]. Czynniki zmiennymi były posuw na ostrze  $f_z$  i prędkość skrawania  $v_c$ . Parametry obróbkowe dobrano zgodnie z zaleceniami producenta, biorąc pod uwagę obrabiany materiał. Zestawienie parametrów skrawania zostało przedstawione w tabeli 1.

Tab. 1. Warunki frezowania czołowego badanych próbek

Parametry skrawania próbek						
$a_p = 0,2 \text{ mm}$						
$f_z = 0,1, \text{ mm/ostrze}$				$v_c = 300, \text{ m/min}$		
Lp.	$v_c, \text{ m/min}$	$n, \text{ obr/min}$	$f_t, \text{ mm/min}$	$f_z, \text{ mm/ostrze}$	$n, \text{ obr/min}$	$f_t, \text{ mm/min}$
1.	200	1247	127	0,02	1911	38
2.	220	1401	140	0,04	1911	76
3.	240	1529	153	0,06	1911	115
4.	260	1656	166	0,08	1911	153
5.	280	1783	178	0,10	1911	191
6.	300	1911	191	0,12	1911	229
7.	320	2038	204	0,14	1911	268
8.	340	2166	217	0,16	1911	306
9.	360	2293	229	0,18	1911	344
10.	380	2420	242	0,20	1911	382
11.	400	2548	255	0,22	1911	420

Próby skrawania przeprowadzono w warunkach tarcia suchego bez płynu chłodząco – smarującego na pionowym centrum obróbkowym AVIA VMC800 [11]. Narzędziem wykorzystanym podczas obróbki była głowica frezarska CoroMill 490 firmy Sandvik Coromant, z pięcioma płytkami z węglików spiekanych typu 490-08T308M-PL.

## 3. ANALIZA WPŁYWU BŁĘDÓW ZAMOCOWANIA OSTRZY W KORPUSIE GŁOWICY FREZOWEJ NA PRZEBIEG PROCESU FREZOWANIA

Analizę wpływu błędów zamocowania ostrzy w korpusie głowicy frezowej na przebieg procesu frezowania przeprowadzono za pomocą modelu graficznego głowicy frezarskiej CoroMill 490, który został opracowany na Politechnice Świętokrzyskiej i opisany w pracy [8].

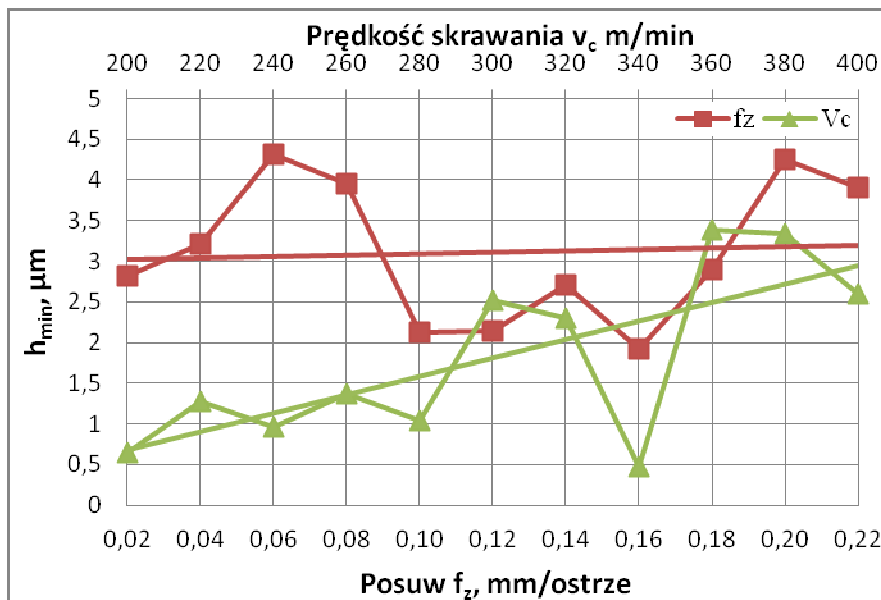
Analizując wyniki badań stwierdzono, że różnica między maksymalną a minimalną długością narzędzia wyniosła 11,04  $\mu\text{m}$ . Największy błąd promieniowego zamocowania płytki skrawającej zmierzono dla płytki zamocowanej w gnieździe nr 5, wyniósł on -117,98  $\mu\text{m}$  co przy założonym posuwie 0,1 mm/ostrze powoduje, że płytka 5 ma posuw ujemny wynoszący -17,98  $\mu\text{m}$ . Badania symulacyjne umożliwiły wyznaczenie jaka liczba ostrzy głowicy frezowej dla danej wartości posuwu na ostrze jest zaangażowana w proces kształtowania struktury geometrycznej powierzchni. Dla posuwu 0,04 mm/ostrze w proces skrawania zaangażowane są tylko 3 płytki z 5, dla posuwu 0,06 mm/ostrze 4 z 5, dopiero po przekroczeniu wartości posuwu 0,12 mm/ostrze w procesie usuwania materiału biorą udział wszystkie ostrza. Wyniki badań zostały naniesione na rysunku 4.

## 4. WYZNACZANIE MINIMALNEJ GRUBOŚCI WARSTWY SKRAWANEJ

W rezultacie przeprowadzonych prób skrawania wyznaczono wpływ prędkości skrawania  $v_c$  i posuwu na ostrze  $f_z$  na wartość parametru  $h_{\min}$  dla stali NC6. Procedura przygotowania, obróbki i pomiaru wartości parametru  $h_{\min}$  została przeprowadzona według metodyki opisanej w pracy [9]. Wyniki badań zostały przedstawione w formie tabel i wykresów w celu zobrazowania przebiegu ich zmian w zależności od parametrów skrawania.

Tab. 2. Wyznaczone wartości parametru  $h_{min}$ 

	Stal NC6										
$f_z$ , mm/ostrze	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2	0,22
$h_{min}$ , $\mu\text{m}$	2,818	3,21	4,31	3,949	2,119	2,139	2,709	1,925	2,892	4,246	3,908
$v_c$ , m/min	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
$h_{min}$ , $\mu\text{m}$	0,641	1,269	0,965	1,371	1,035	2,513	2,295	0,476	3,391	3,342	2,603

Rys. 1. Wyniki pomiarów wartości parametru  $h_{min}$  dla stali NC6

Analizując wpływ posuwu na ostrze  $f_z$  na minimalną grubość warstwy skrawanej  $h_{min}$  dla próbek wykonanych ze stali NC6 (rys. 1) zaobserwowano korzystny przedział prędkości posuwowych (0,1 ÷ 0,16 mm/ostrze), dla którego zmierzona wartość  $h_{min}$  ustabilizowała się na najniższym poziomie  $2,1 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ . Dla prędkości posuwowych w zakresach 0,02 ÷ 0,06 oraz 0,16 ÷ 0,2 mm/ostrze obserwowano wzrost wartości parametru  $h_{min}$  wraz ze wzrostem prędkości posuwowej. Wprowadzona na wykresie linia trendu, pokazuje, że wraz ze wzrostem posuwu na ostrze wartość parametru  $h_{min}$  wykazuje niewielki trend wzrostowy, lecz jest to bardzo duże uogólnienie danych.

Analizując dane umieszczone w tabeli 2 oraz wykres prezentujący wpływ prędkości na parametr minimalnej grubości warstwy skrawanej (rys. 1) stwierdzono, że wzrost prędkości skrawania  $v_c$  ma niekorzystny wpływ na parametr  $h_{min}$  powodując jego stopniowy wzrost począwszy od  $h_{min} \approx 0,6 \mu\text{m}$  dla  $v_c = 200 \text{ m/min}$  kończąc na  $h_{min} \approx 3,3 \mu\text{m}$  dla  $v_c = 380 \text{ m/min}$ , jedynym wyjątkiem okazała się wartość prędkości skrawania  $v_c = 340 \text{ m/min}$  dla której określono najmniejszą dla całego mierzonego zakresu wartość  $h_{min} = 0,47 \mu\text{m}$ .

## 5. POMIAR PRZEMIESZCZEŃ WZGLĘDNYCH W UKŁADZIE N – PO PODCZAS FREZOWANIA CZOŁOWEGO STALI NC6

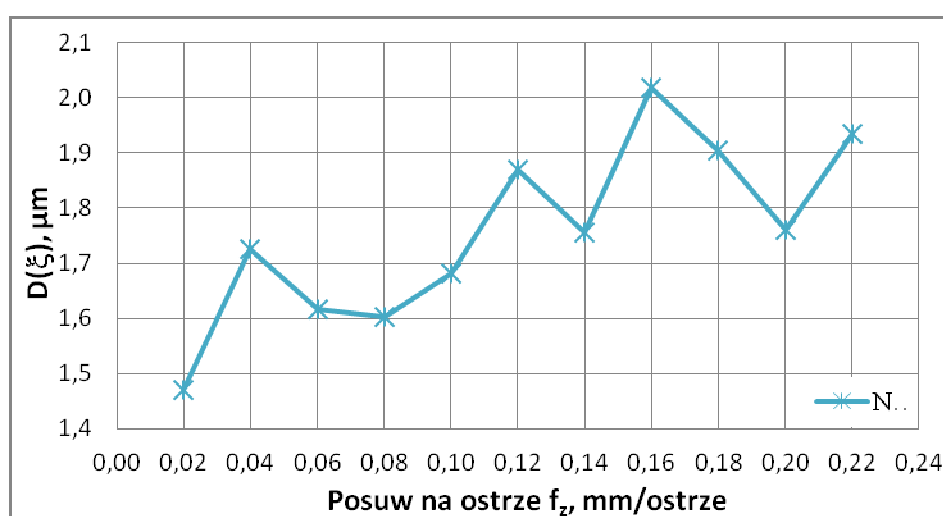
Przedmiotem badań było określenie wpływu posuwu na ostrze oraz prędkości skrawania na przemieszczenia względne narzędzia i przedmiotu obrabianego podczas frezowania czołowego próbek wykonanych ze stali NC6. Parametrem opisującym wielkość przemieszczeń względnych przydatnym do modelowania i prognozowania chropowatości powierzchni  $R_a$  jest odchylenie standardowe  $D(\xi)$  tych przemieszczeń. Procedura pomiaru i obróbki sygnału przemieszczeń względnych w układzie N – PO została opisana w pracy [10].

W rezultacie przeprowadzonych badań zarejestrowano sygnały przemieszczeń względnych w układzie N – PO podczas procesu frezowania stali NC6, które poddano filtracji i wyznaczono wartość odchylenia standardowego przemieszczeń względnych w układzie N – PO. Następnie wyznaczono wpływ prędkości skrawania  $v_c$  i posuwu na ostrze  $f_z$  na wartość parametru odchylenia standardowego przemieszczeń względnych w układzie narzędzie – przedmiot obrabiany  $D(\xi)$ . Wyniki badań zostały przedstawione w formie tabel i wykresów w celu zobrazowania przebiegu ich zmian w zależności od parametrów skrawania. W tabeli 3 przedstawiono podsumowanie wyników uzyskanych podczas prac badawczych mających na celu określenie wpływu wybranych parametrów skrawania tj. posuwu na ostrze oraz prędkości skrawania na zmianę parametru  $D(\xi)$ .

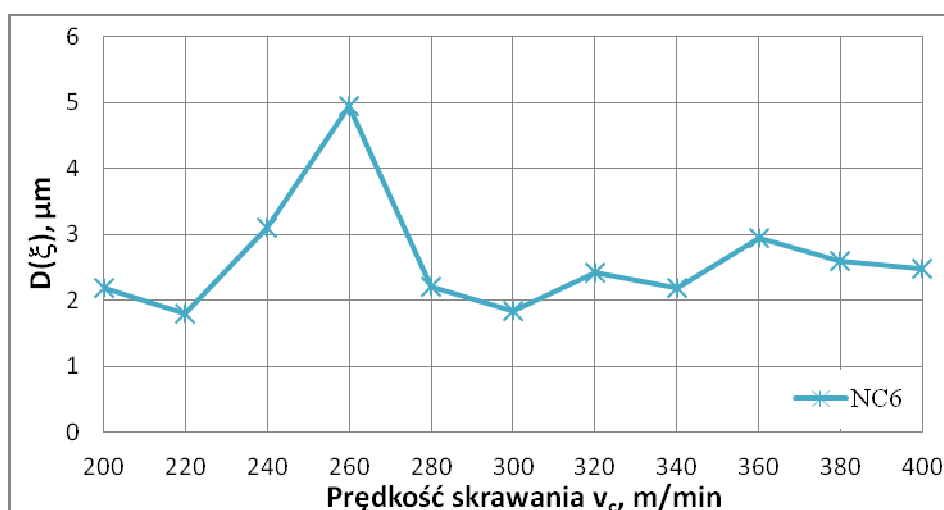
Analizując dane zamieszczone w tabeli 3 i przedstawione na rysunku 2 zaobserwowano niekorzystny wpływ zwiększania posuwu na ostrze na wartości parametru  $D(\xi)$ . Dla prób skrawania z wykorzystaniem stali NC6 zaobserwowano trend wzrostowy parametru  $D(\xi)$  wraz ze wzrostem posuwu na ostrze, dla całego zakresu badanego posuwu na ostrze zwiększyły się one o  $0,55 \mu\text{m}$ .

Tab. 3. Wyznaczone wartości parametru  $D(\xi)$

	Stal NC6										
$f_z$ , mm/ostrze	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2	0,22
$D(\xi)$ , $\mu\text{m}$	1,47	1,73	1,62	1,6	1,68	1,87	1,76	2,02	1,9	1,76	1,93
$v_c$ , m/min	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
$h_{\min}$ , $\mu\text{m}$	2,19	1,79	3,11	4,95	2,2	1,84	2,42	2,19	2,95	2,6	2,48



Rys. 2. Zestawienie wyników obliczonego parametru  $D(\xi)$  dla różnych wartości prędkości posuwowych



Rys. 3. Zestawienie wyników obliczonego parametru  $D(\xi)$  dla różnych wartości prędkości skrawania

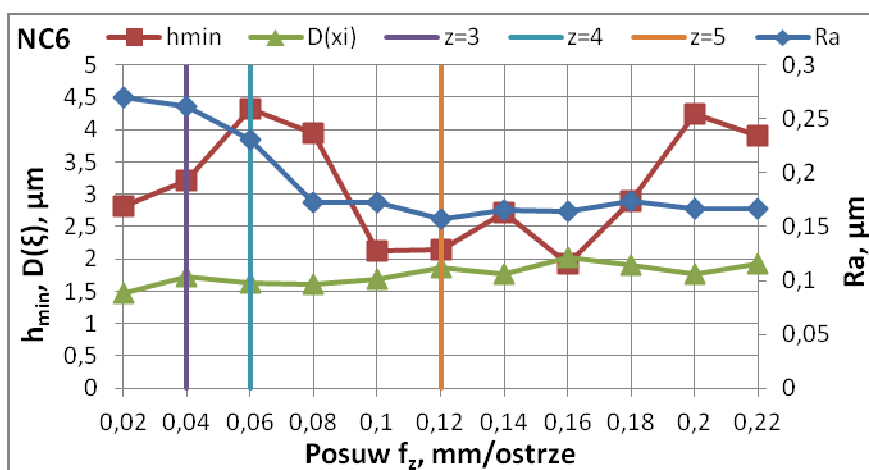
Wyniki badań przedstawione na rysunku 3 pokazują, że istnieją charakterystyczne przedziały prędkości skrawania, dla których praca narzędzia przebiega niestabilnie. Przeprowadzone próby skrawania wykazały, że

podczas obróbki głowicą walcowo – czołową CoroMill 490, wyposażoną w płytki 490R–08T308M–PL –1030 na centrum frezarskim VMC800, niewskazane jest stosowanie prędkości skrawania zbliżonej do 260 m/min, dla której parametr  $D(\xi)$  osiągnął wartość maksymalną 4,95  $\mu\text{m}$ .

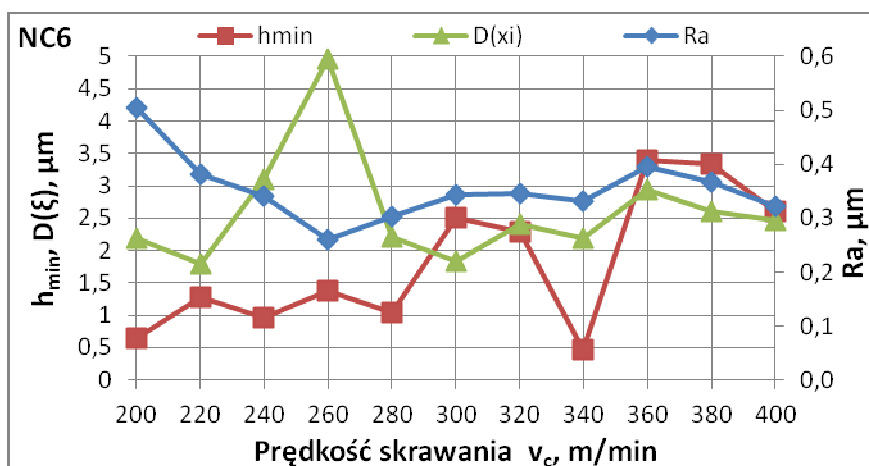
## 6. WPŁYW WYBRANYCH PARAMETRÓW OBRÓBKI NA STRUKTURĘ GEOMETRYCZNĄ POWIERZCHNI FREZOWANYCH CZOŁOWO

Wykresy poniżej przedstawiają wpływ wzrostu posuwu na ostrze oraz prędkości skrawania na minimalną grubość warstwy skrawanej, przemieszczenia względne w układzie narzędzie – przedmiot obrabiany, liczbę ostrzy zaangażowanych w skrawanie oraz wartość parametru  $R_a$  chropowatości powierzchni. Pionowymi liniami na wykresach opracowanych dla zmiennego posuwu na ostrze zaznaczone zostały przedziały, które reprezentują liczbę ostrzy biorących udział w procesie generowania SGP.

Analizując wyniki badań dla stali NC6 przedstawione na rysunku 4 możemy stwierdzić, że stosowanie bardzo małych prędkości posuwowych w zakresie  $0,02 \div 0,08$  mm/ostrze ma niekorzystny wpływ na strukturę geometryczną powierzchni frezowanych czołowo, ponieważ w tym zakresie zmierzono największe wartości parametru  $R_a$  chropowatości powierzchni. W początkowej fazie wzrostu prędkości posuwowej pomimo tego, że parametry  $h_{\min}$  i  $D(\xi)$  zwiększały swoją wartość parametr  $R_a$  obniżał swoją wartość. Poprawa jakości powierzchni może być skutkiem wielokrotnego przejścia krawędzi dogładzającej płytki skrawającej po obrobiejonej powierzchni, oraz zwiększającą się liczbą płytek biorących udział w procesie usuwania materiału co widać na rysunku 4.



Rys. 4. Wpływ zmiany posuwu na ostrze na parametr  $R_a$  chropowatości powierzchni oraz wybrane czynniki obróbkowe towarzyszące procesowi frezowania czołowego stali NC6



Rys. 5. Wpływ zmiany prędkości skrawania na parametr  $R_a$  chropowatości powierzchni oraz wybrane czynniki obróbkowe towarzyszące procesowi frezowania czołowego stali NC6

Podczas obróbki próbek ze stali NC6 (rys. 5), przy zmiennej prędkości skrawania zaobserwowano, że parametr Ra miał najmniejszą wartość gdy parametr  $D(\xi)$  osiągnął wartość maksymalną, może to być konsekwencją korzystnego oddziaływania przemieszczeń względnych w układzie narzędzie przedmiot obrabiany i geometrii narzędzia. Zastosowanie narzędzia, w którym płytki skrawające posiadały krawędź dogładzającą umożliwiło wykorzystanie przemieszczeń względnych w układzie narzędzie – przedmiot do wygładzenia powierzchni obrobionej. Stosowanie małych prędkości skrawania na poziomie 200 m/min miało niekorzystny wpływ na strukturę geometryczną powierzchni frezowanej czołowo, pomimo że parametry  $h_{\min}$  i  $D(\xi)$  w tym zakresie prędkości skrawania miały niskie wartości.

## 7. WNIOSKI

1. Wartość minimalnej grubości warstwy skrawanej zależy od wartości posuwu i prędkości skrawania. Stosując prędkości posuwowe z przedziału (0,1 ÷ 0,16 mm/ostrze) uzyskano najmniejsze wartości parametru  $h_{\min}$  podczas frezowania czołowego stali NC6.  
Wzrost prędkości skrawania  $v_c$  ma niekorzystny wpływ na parametr  $h_{\min}$  powodując jego stopniowy wzrost od  $h_{\min} \approx 0,6 \mu\text{m}$  dla  $v_c = 200 \text{ m/min}$  do  $h_{\min} \approx 3,3 \mu\text{m}$  dla  $v_c = 380 \text{ m/min}$ . Jedynym wyjątkiem okazała się wartość prędkości skrawania  $v_c = 340 \text{ m/min}$  dla wartości  $h_{\min} = 0,47 \mu\text{m}$ .
2. Wzrost wartości posuwu na ostrze miał niekorzystny wpływ na wartości parametru  $D(\xi)$ , dla całego zakresu badanego posuwu (0,02 ÷ 0,22 mm/ostrze) zwiększyły się one o 0,55  $\mu\text{m}$ . Dla badanego zakresu prędkości skrawania (200 ÷ 400 m/min) istnieją charakterystyczne przedziały prędkości skrawania, dla których praca narzędzia przebiega niestabilnie. Niewskazane jest stosowanie prędkości skrawania zbliżonej do 260 m/min, dla której parametr  $D(\xi)$  osiągnął wartość maksymalną 4,95  $\mu\text{m}$ .
3. Stosowanie bardzo małych prędkości posuwowych w zakresie 0,02 ÷ 0,08 mm/ostrze ma niekorzystny wpływ na strukturę geometryczną powierzchni frezowanych czołowo, ponieważ w tym zakresie zmierzono największe wartości parametru Ra chropowatości powierzchni, dodatkowo powoduje to małą wydajność obróbki. Podobnie stosowanie małych prędkości skrawania na poziomie 200 m/min miało niekorzystny wpływ na strukturę geometryczną powierzchni frezowanej czołowo.
4. Zastosowanie narzędzia, w którym płytki skrawające posiadały krawędź dogładzającą umożliwiło wykorzystanie przemieszczeń względnych w układzie narzędzie – przedmiot do dodatkowego wygładzenia powierzchni obrobionej.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Adamczak S.: *Pomiary Geometryczne Powierzchni. Zarysy Kształtu, Falistość i Chropowatość*. Warszawa. WNT 2009.
- [2] Benardos P.G., Vosniakos G.-C.: *Predicting surface roughness in machining: a review*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 (2003) 833–844.
- [3] Dae K. B., Tae J. K., Hee S. K., *A dynamical surface roughness model for milling*. Precision Engineering, vol. 20. No. 3, New York 1997, s. 123 – 132.
- [4] Grzesik W.: *Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych* WNT Warszawa 2010.
- [5] Jang D.Y., Choi Y.G., Kim H.G., Hsiao A.: *Study of correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop an on-line roughness measuring technique in hard turning*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 36(1996) 4, pp. 453-464.
- [6] Michalik P., Zając J., Hatala M., Mital D., Fecova V.: *Monitoring surface roughness of thin-walled components from steel C45 machining down and up milling*. Measurement 2014, pp. 416-428.
- [7] Miko E.: *Konstytuowanie mikronierówności powierzchni metalowych obrobionych narzędziami zdefiniowanej stereometrii ostrzy*, Monografie, Studia, Rozprawy Kielce 2004 No. 46.
- [8] Nowakowski Ł., Miko E.: *Analiza błędów zamocowania ostrzy w korpusie głowicy frezowej na przebieg procesu skrawania*, Mechanik 8-9/2014, s. 73-80/731.
- [9] Nowakowski Ł., Miko E.: *Pomiar minimalnej grubości warstwy skrawanej dla procesu frezowania czołowego*, Mechanik, 2013, Nr. 7, s. 521 – 525.
- [10] Nowakowski Ł., Miko E.: *Pomiar i analiza przemieszczeń względnych w układzie narzędzie – przedmiot obrabiany podczas frezowania czołowego*, Mechanik, 2012, Nr 10, s. 870-872.
- [11] Ozimina D.: *Eksploracja systemów tribologicznych*. Monografia M48. Kielce 2013.
- [12] Polański Z.: *Metody optymalizacji w technologii maszyn*. PWN. Warszawa 1977.