

Mgr inż. Stanisław Bławucki, dr inż. Jakub Matuszak,  
dr hab. inż. Kazimierz Zaleski, prof. PL (Politechnika Lubelska)

## **BADANIA PORÓWNAWCZE WYBRANYCH WSKAŹNIKÓW SKRAWALNOŚCI W PROCESIE FREZOWANIA STOPÓW NIKLU INCONEL 625 I INCONEL 718**

### Streszczenie

Stopy niklu są cennym materiałem konstrukcyjnym, stosowanym w przemyśle lotniczym, energetycznym i chemicznym. Wytwarzanie elementów z tych stopów wiąże się z dużymi problemami ze względu na ich trudnoobrabialność. W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych składowych siły skrawania oraz chropowatości powierzchni w procesie frezowania czołowego trudnoobrabialnych stopów niklu INCONEL 625 i INCONEL 718. Badania prowadzono przy zmiennych parametrach technologicznych.

*Słowa kluczowe: stopy niklu, wskaźniki skrawalności, frezowanie czołowe*

## **COMPARATIVE RESEARCH ON SELECTED MACHINABILITY INDICATORS OF NICKEL ALLOY MILLING – INCONEL 625 AND INCONEL 718**

### Abstract

Nickel alloys are valuable constructional materials, used in aircraft, power and chemical industry. These alloys are hard to machine, so production of nickel alloy parts causes some difficulties. This paper presents experimental research results of cutting force, and the surface roughness in face milling of INCONEL 625 and INCONEL 718 nickel alloys, which are difficult to machine. Research was conducted with variable technological parameters.

*Keywords: nickel alloys, machinability indicators, face milling*

# **BADANIA PORÓWNAWCZE WYBRANYCH WSKAŹNIKÓW SKRAWALNOŚCI W PROCESIE FREZOWANIA STOPÓW NIKLU INCONEL 625 I INCONEL 718**

Stanisław BŁAWUCKI<sup>1</sup>, Jakub MATUSZAK<sup>2</sup>, Kazimierz ZALESKI<sup>3</sup><sup>1</sup>

## **1. WPROWADZENIE**

Materiały odporne na wysoką temperaturę stanowią największą grupę materiałów używanych do produkcji tzw. „gorącej sekcji” sprzętek silników lotniczych oraz wirników turbin strumieniowych w przemyśle energetycznym. Przewiduje się dalszy wzrost zastosowań tych stopów [1, 8]. Typowymi przedstawicielami stopów na bazie niklu z grupy HRSA (ang. Heat Resistant Super Alloys) są INCONEL 625 oraz INCONEL 718. Materiały te wykazują stabilność swojej mikrostruktury oraz geometrii części podczas pracy w wysokich temperaturach, co wynika z ich niskiej przewodności cieplnej ( $9,8 \div 11,1 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ ) [12]. Właściwości superstopów INCONEL powodują, że są one materiałami bardzo trudnymi do obróbki skrawaniem [1].

Superstopy na bazie niklu mają wysokie powinowactwo chemiczne do wielu materiałów narzędziowych. Prowadzi to do przyspieszonego dyfuzyjnego zużycia części roboczej narzędzia [4, 12]. Należy dodać, że charakter pracy narzędzia (ciągły - toczenie lub przerywany-frezowanie) w dużym stopniu wpływa na jego trwałość. Duża wytrzymałość na ścinanie stopów grupy INCONEL pobudza układ obróbkowy do drgań samowzbudnych, które obniżają jakość powierzchni powstałej po obróbce skrawaniem. Zbyt wysoka chropowatość powierzchni przedmiotów przeznaczonych do pracy w zmiennych warunkach termodynamicznych jest miejscem koncentracji karbów, a to przekłada się na obniżenie ich wytrzymałości zmęczeniowej [6, 16].

Na granicy ziaren w strukturze krystalicznej stopu INCONEL ulokowane są twarde węgliki NiC, CrC, TiC, MoC, WC, FeC oraz NbC, które wyrwane z materiału, powodują niekorzystne bruzdy na powierzchni obrabianego przedmiotu [7, 12]. Zawartość wspomnianych związków chemicznych w objętości skrawanego materiału przyczynia się również do przyspieszonego zużycia części roboczej narzędzia skrawającego.

---

<sup>1</sup> Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej, KPIP, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin

Trwałość narzędzi stanowi poważny problem podczas obróbki stopów z grupy HRSA i w warunkach produkcyjnych zazwyczaj nie przekracza  $2 \div 10$  minut [7, 10]. Głównym czynnikiem powodującym zużycie krawędzi skrawającej jest utwardzona warstwa wierzchnia obrabianego materiału, która powoduje lokalne starcie powierzchni roboczych narzędzia o szerokości mniejszej lub równej głębokości skrawania [12].

Dobór i optymalizacja parametrów technologicznych przy frezowaniu materiałów HRSA obejmuje wiele czynników. Na pierwszym miejscu jest prędkość skrawania. Zbyt niska jej wartość powoduje silne drgania samowzbudne i nadmierne zużycie narzędzia, a zbyt duża wartość  $v_c$  prowadzi do wzrostu temperatury w strefie skrawania oraz intensywnego zużycia powierzchni przyłożenia części roboczej narzędzia. Zaleca się stosowanie prędkości w zakresie  $20 \div 90$  m/min dla popularnych materiałów narzędziowych [2, 3, 9, 11, 15]. Głębokość skrawania  $a_p$  zazwyczaj nie przekracza 1 mm, a posuw na ostrze  $f_z$  zawiera się w przedziale  $0,05 \div 0,2$  mm [2, 5, 9, 10, 11, 15]. Warunki smarowania i chłodzenia są niemniej ważne, toteż zastosowanie intensywnego chłodzenia lub minimalnego smarowania MQL (ang. Minimum Quantity Lubrication) w dużym stopniu wydłuży czas pracy narzędzia [16].

Osobnym zagadnieniem przy frezowaniu stopu INCONEL 718 jest odpowiednia strategia obróbki. Zaleca się stosowanie frezowania mimośrodowego o szerokości skrawania od 30% do 75% średnicy narzędzia. Nie zaleca się frezowania całą szerokością narzędzia oraz pozycjonowania głowicy na środku obrabianej powierzchni [5, 11]. Zastosowanie frezowania współbieżnego pozwala na uniknięcie zjawiska zgniatania wióra, gdyż jego grubość na wyjściu narzędzia jest minimalna. Celem badań było porównanie sił skrawania oraz chropowatości obrobionej powierzchni w procesie frezowania czołowego stopu niklu INCONEL 625 oraz INCONEL 718. Wybór wspomnianych stopów do badań doświadczalnych wynika z ich dużej popularności w kluczowych gałęziach przemysłu. Niewystarczający stan wiedzy dotyczący obróbki stopów z grupy INCONEL podnosi koszty produkcji wynikające z nadmiernego zużycia narzędzi oraz produkcji braków. Niniejsza publikacja ma na celu ocenę wpływu parametrów frezowania superstopów HRSA na składowe siły skrawania i chropowatość obrobionej powierzchni.

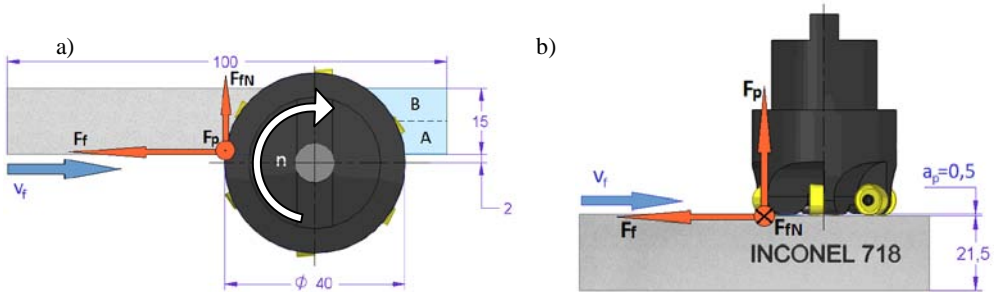
## 2.METODYKA BADAŃ

W badaniach wskaźników skrawalności superstopów INCONEL 625 oraz INCONEL 718 (tab. 1) użyto próbek w kształcie prostopadłościanów o wymiarach (15 x 22 x 100) mm (rys. 1). Doboru parametrów skrawania dokonano na podstawie literatury oraz zaleceń producentów narzędzi skrawających [5, 9, 11, 14, 15]. Zastosowano głowicę frezarską sześćostrzową, składaną, o średnicy zewnętrznej  $D_z = 40$  mm i efektywnej średnicy skrawania  $D_c = 32$  mm (rys. 1). Użyto okrągłych płytek skrawających z węglików spiekanych, dedykowanych do frezowania stopów nierdzewnych, powlekanych warstwą TiAlN o dodatnim kącie natarcia. Do badań skrawalności

superstopów wykorzystano pionowe centrum obróbkowe MOC MECHANICY Fv-580A.

Tab. 1. Zestawienie właściwości fizycznych superstopów INCONEL 625 i INCONEL 718 [13]

Material	Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	Główne pierwiastki stopowe	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Granica plastyczności [MPa]	Modul Younga [GPa]	Przewodność cieplna [W/m°C]
INCONEL 625	8,44	Ni/Cr/Mo 58,0/20,0/8,0	758	344	205	9,8
INCONEL 718	8,23	Ni/Cr/Fe 50/17/6,6	1034	862	200	11,1



Rys. 1. Układ przedmiot obrabiany–narzędzie w czasie obróbki stopu INCONEL 718 wraz z zaznaczonym kierunkiem pomiaru składowych siły skrawania: a) widok od góry, b) widok boczny

Pomiar siły biernej i posuwowej zrealizowano przy użyciu siłomierza Kistler 9257B, który zestawiono w torze pomiarowym ze wzmacniaczem 5070A oraz modulem do akwizycji danych pomiarowych DAQ 5697A. Sygnał rejestrowano z wykorzystaniem oprogramowania DynoWare 2.7, które pozwoliło na zbieranie wyników pomiaru z częstotliwością 2000 Hz. Następnie wykonano analizę widmową składowych siły skrawania dla obu obrabianych materiałów, jak w pracy [13].

Parametrami stałymi eksperymentu były: głębokość skrawania, wynosząca 0,5 mm, strategia obróbki–frezowanie współbieżne mimośrodowe, użyte narzędzie – frez sześcioostrzowy (rys. 1), obrabiarka i urządzenia pomiarowe. Próbkę frezowano w warunkach chłodzenia emulsją wodno-olejową.

Na podstawie analizy literatury oraz badań wstępnych przyjęto plan badań eksperymentalnych. Zmiennymi warunkami eksperymentu były parametry technologiczne: prędkość skrawania w zakresie 20÷80 m/min przy stałym posuwie  $f_z = 0,08$  mm/ostrze, oraz posuw na ostrze w przedziale 0,04÷0,16 mm/ostrze przy stałej prędkości  $v_c = 40$  m/min. Frezowano dwa superstopy: INCONEL 625 oraz INCONEL 718. W każdym punkcie pomiarowym próbę powtórzono pięciokrotnie i na podstawie otrzymanych wyników przebiegu siły biernej i posuwowej sporządzono wykresy  $F = f(t)$ . Ze względu na relatywnie małe wartości siły normalnej  $F_{rN}$  nie uwzględniano jej w analizie

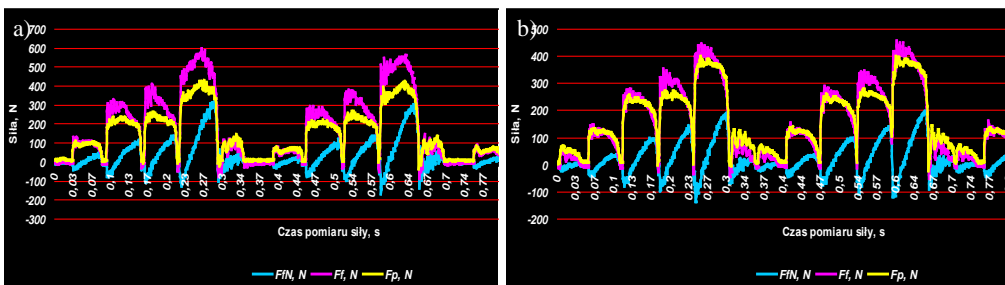
wyników badań. Zbadano zaś stan geometryczny powierzchni i sporządzono mapy 3D topografii powierzchni frezowanych próbek.

Chropowatość powierzchni (rys. 5) i (rys. 6) próbek po frezowaniu zmierzono za pomocą profilometru mobilnego Surtronic 3+ Taylor Hobson. Dla wybranych próbek przeprowadzono badania topografii powierzchni na urządzeniu do pomiaru konturu chropowatości 3D T8000 RC120-400 Hommel Etamic (rys. 7).

### 3. WYNIKI BADAŃ

W czasie frezowania badanych stopów HRSA zauważono, że wszystkie składowe siły skrawania cechowały się dynamicznym charakterem przebiegu wartości w czasie pomiaru (rys. 2). Było to związane z okresowym charakterem obróbki podczas frezowania. Uzyskane wyniki siły posuwowej  $F_f$  i biernej  $F_p$  wykazywały zmienne wartości dla każdego z pracujących ostrzy. Za powstały stan rzeczy może odpowiadać nieprecyzyjne ustawienie płytek w gniazdach oprawki. Inną przyczyną wahania siły biernej i posuwowej w czasie frezowania może być tendencja materiału obrabianego do powierzchniowego „hartowania się” i tworzenia twardej warstewki [12].

Kolejną prawdopodobną przyczyną powstałego kształtu sygnału z siłomierza mogły być drgania, zarówno wymuszone jak i samowzbudne, związane z okresowym charakterem pracy narzędzia oraz obroną strategią obróbki. Choć nie zauważono silnego efektu narostu na ostrzu, zjawisko to jest charakterystyczne przy obróbce superstopów grupy INCONEL [3, 2].

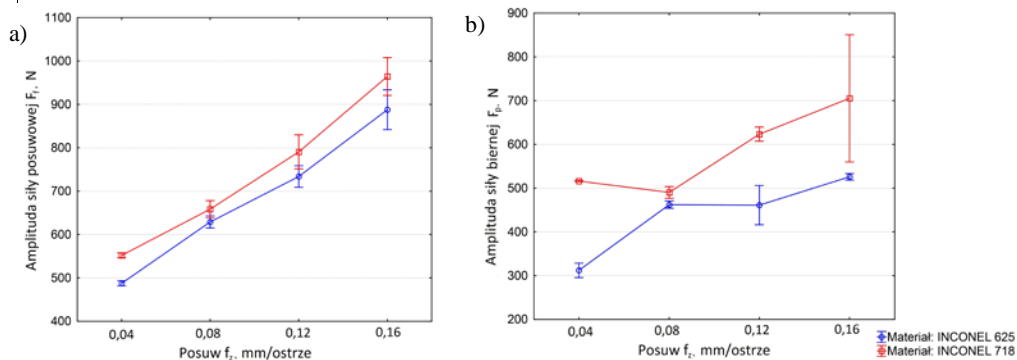


Rys. 2. Rozkład składowych siły podczas frezowania czołowego superstopów  $v_c = 20$  i  $f_z = 0,08$ :  
a) INCONEL 625, b) INCONEL 718

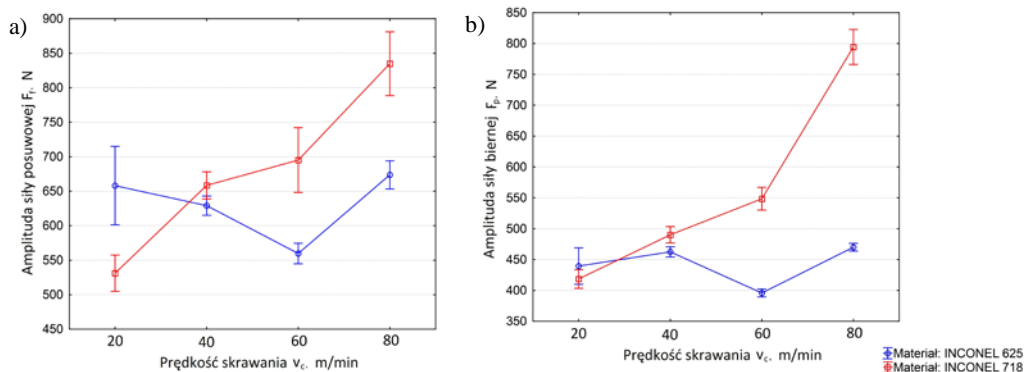
Siła bierna  $F_p$  oraz siła posuwowa  $F_f$  przyjmują zbliżone wartości amplitudy dla obydwu badanych materiałów (rys. 2). Przy obliczeniach wartości amplitudy siły przyjęto maksymalną i minimalną wartość z zakresu 0,8 sekundy stabilnej pracy narzędzia podczas próby.

Sporządzając wykres zależności składowych siły w funkcji parametrów obróbki można wskazać warunki skrawania superstopów dla których wystąpiła najniższa siła bierna i najniższa siła posuwowa (rys. 3). Zauważono, że występuje niewielka różnica

w wartościach amplitudy siły podczas frezowania badanych stopów HRSA. Mniejszą wartość amplitudy siły posuwowej oraz siły biernej odnotowano w czasie skrawania superstopu INCONEL 625. Wraz ze zwiększaniem posuwu na ostrze zauważono prawie liniowy wzrost amplitudy siły biernej i posuwowej (rys. 4). W przypadku superstopu INCONEL 625 zauważono, że wzrost prędkości skrawania nie prowadzi do wzrostu amplitudy siły posuwowej i biernej tak jak to ma miejsce dla stopu INCONEL 718 (rys. 4).



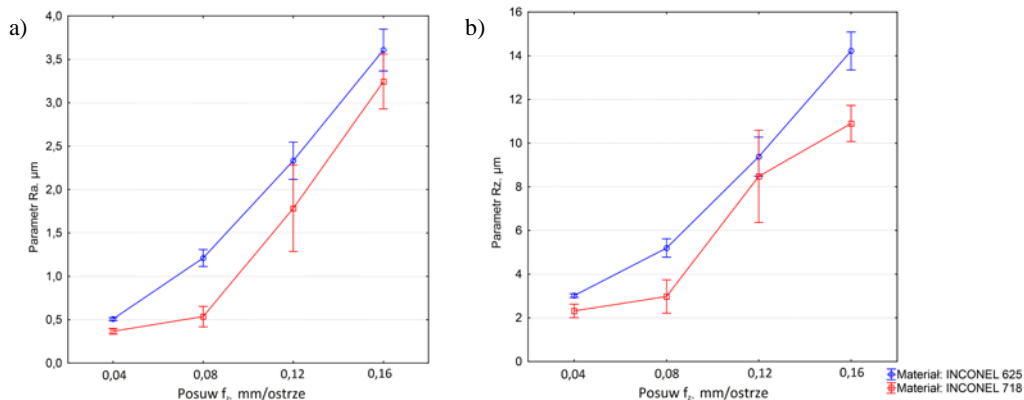
Rys. 3. Wpływ posuwu na ostrze  $f_z$  na wartość amplitudy siły podczas frezowania stopów INCONEL 625 i INCONEL 718 ( $v_c = 40$  m/min): a) amplituda siły posuwowej  $F_f$ , b) amplituda siły biernej  $F_p$



Rys. 4. Wpływ prędkości skrawania  $v_c$  na wartość amplitudy siły podczas frezowania stopów INCONEL 625 i INCONEL 718 ( $f_z = 0,08$  mm/ostrze): a) amplituda siły posuwowej  $F_f$ , b) amplituda siły biernej  $F_p$

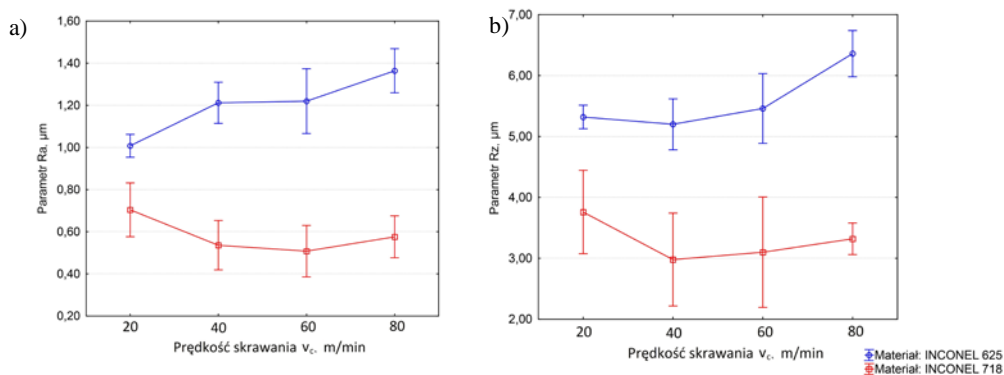
Na powierzchni badanych próbek odnotowano nierównomierny rozkład chropowatości powierzchni, spowodowany obraną strategią obróbki. Wartości parametrów  $R_a$  oraz  $R_z$  były mniejsze w obszarze „A” zaznaczonym na rysunku 1b. Największy wpływ na wybrane parametry chropowatości powierzchni wywarł posuw.

Nie stwierdzono jednoznacznego wpływu prędkości skrawania na chropowatość powierzchni, w przypadku stopu INCONEL 718 nastąpił, zgodnie z oczekiwaniami, niewielki spadek chropowatości powierzchni (rys. 6). W przypadku stopu INCONEL 625 zaobserwowano nieznaczny wzrost chropowatości powierzchni, towarzyszący zwiększaniu prędkości skrawania.

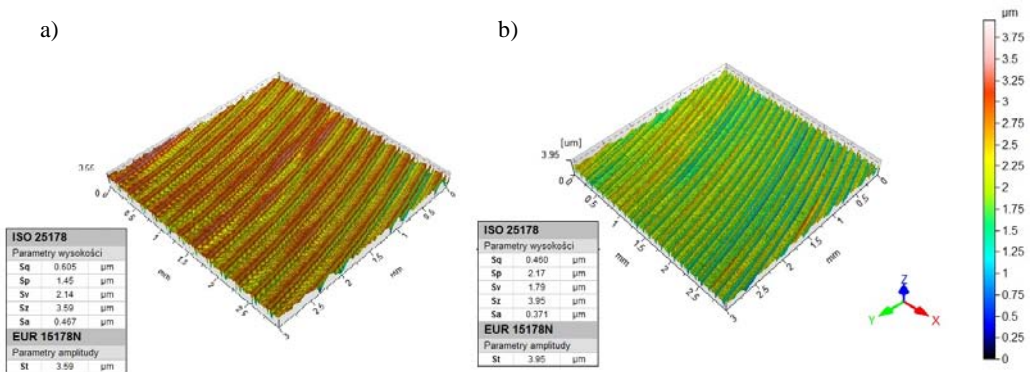


Rys. 5. Wpływ posuwu na ostrze  $f_z$  na wartość parametrów chropowatości powierzchni po frezowaniu stopów INCONEL 625 i INCONEL 718 ( $v_c = 40$  m/min): a) parametr  $R_a$ , b) parametr  $R_z$

Sporządzone mapy 3D topografii powierzchni potwierdzają wyniki dotychczasowych badań. Odnotowano niewielkie różnice w wartościach przestrzennych parametrów chropowatości badanych superstopów dla tych samych warunków frezowania (rys. 5, 6). Można stwierdzić, że najmniejszą chropowatość powierzchni obydwu stopów odnotowuje się przy  $f_z = 0,04$  mm/ostrze oraz  $v_c = 40$  m/min. Najgorsza chropowatość występuje dla dużych wartości posuwu.



Rys. 6. Wpływ prędkości skrawania  $v_c$  na wartość parametrów chropowatości powierzchni po frezowaniu stopów INCONEL 625 i INCONEL 718 ( $f_z = 0,08$  mm/ostrze): a) parametr  $R_a$ , b) parametr  $R_z$



Rys. 7. Topografia powierzchni stopów HRSA po frezowaniu ( $f_z = 0,04$  mm/ostrze,  $v_c = 40$  m/min):  
a) INCONEL 625, b) INCONEL 718

#### 4. WNIOSKI

Przeprowadzone badania oraz analiza wyników pozwoliły na sformułowanie kilku wniosków dotyczących porównania skrawalności badanych stopów INCONEL.

1. Zauważono duże wahania wartości siły biernej oraz siły posuwowej, co może świadczyć o procesach ciepłno-chemicznych zachodzących w warstwie wierzchniej obrabianego stopu INCONEL. Występujące w czasie obróbki drgania w układzie roboczym mogą prowadzić do wahań wartości siły na ostrzach narzędzia a ponadto powodują przyspieszone zużycie krawędzi skrawających narzędzia.
2. Biorąc pod uwagę amplitudę siły w czasie skrawania stwierdzono, że lepszą skrawalnością charakteryzuje się INCONEL 625, dla którego uzyskuje się niższe wartości amplitudy siły biernej oraz siły posuwowej w całym zakresie badań.
3. Biorąc pod uwagę chropowatość powierzchni obrobionej stwierdzono, że lepszą skrawalnością wykazuje się superstop INCONEL 718, dla którego uzyskano niższe wartości parametru Ra i Rz w całym zakresie eksperymentu.
4. Chropowatość powierzchni stopu INCONEL 625 po frezowaniu czołowym jest o około 50 ÷ 100% wyższa od chropowatości powierzchni stopu INCONEL 718 powstałej przy tych samych parametrach frezowania.
5. Najlepszą skrawalność badanych stopów INCONEL w aspekcie siły i chropowatości powierzchni uzyskano w przedziale parametrów: posuwu  $f_z = 0,04 ÷ 0,08$  mm/ostrze dla prędkości skrawania  $v_c = 40 ÷ 60$  m/min.



## LITERATURA

- [1] ARUNACHALAM R.M., MANNAN M.A., SPOWAGE A.C., *Surface Integrity when Machining Age Hardened Inconel 718 with Coated Carbide Cutting Tools*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004): 1481–1491.
- [2] BENGHERSALLAH M. , BOULANOUAR L., LECOZ G., DUDZIŃSKI D., *Dry high speed milling of nickel-based superalloy*, MECHANIKA. 2013 Volume 19(2): 223-228.
- [3] DEVILLEZ A., LE COZ G., DOMINIAK S., DUDZINSKI D., *Dry Machining of Inconel 718, Workpiece Surface Integrity*, Journal of Materials Processing Technology 211 (2011): 1590– 1598.
- [4] DUDZINSKI D., DEVILLEZ A., MOUFKI A., LARROUQUE`RE D., ZERROUKI V., VIGNEA U., *A review of Developments Towards Dry and High Speed Machining of Inconel 718 Alloy*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004): 439–456.
- [5] ESTREMS M., SÁNCHEZ HT., KURFESS T., BUNGET C., *Influence of Speed on Wear and Cutting Forces in End-Milling Nickel Alloy*, The 4-th Engineering Society International Conference (MESIC 2011) AIP Conf. Proc. 1431, (2012): 433-440
- [6] FANG N., SRINIVASA PAI P., MOSQUEA S., *Effect of Tool Edge Wear on the Cutting Forces and Vibrations in High-Speed Finish Machining of Inconel718*: Int J Adv Manuf Technol 52 (2011): 65–77.
- [7] KASIM M.S., CHEHARON C.H., GHANI J.A., SULAIMAN M.A., YAZID M.Z.A., *Wear Mechanism and Notch Wear Location Prediction Model in Ball Nose End Milling of Inconel 718*, Wear 302 (2013): 1171–1179.
- [8] MAUROTTO A., MUHAMMAD R., ROY A., BABITSKY V., SILBERSCHMIDT V., *Comparing Machinability of Ti-15-3-3-3 and Ni-625 Alloys in UAT*, Procedia CIRP 1 ( 2012 ): 330 – 335.
- [9] NG E., LEE D., SHARMAN A., DEWES R., ASPINWAL D., *High Speed Ball Nose End Milling of Inconel 718*, Annals of the CIRP Vol. 49/1/2000: 41-46.
- [10] RAMANUJAM R., VENKATESAN K., SABENA V., *Influence of Cutting Parameters on Machinability of INCONEL 718 Alloy with Coated Carbide Insert-A Taguchi Based Fuzzy Logic Approach*, ARPN Journal of Engineering and Applied Science, VOL. 9, NO. 5, MAY 2014.
- [11] SANDVIK POLSKA., *Superstopy żaroodporne –przewodnik po zastosowaniach*, Advanced Manufacturing Research Centre 2010: 60-120.
- [12] SHARMAN A., DEWES R., ASPINWALL D., *Tool Life when High Speed ball Nose End Milling Inconel 718 TM*, Journal of Materials Processing Technology 118 (2001): 29-35.
- [13] SŁODKI B. *Wpływ temperatury i siły skrawania na postać wióra przy toczeniu wzdłużnym stopów INCONEL 625 i INCONEL 718*, Inżynieria Maszyn, R. 18, z. 4, 2013: 28-41
- [14] UCUN I., ASLANTAS K., BEDIR F. *An Experimental Investigation of the Effect of Coating Material on Tool Wear in Micro Milling of Inconel 718 Super Alloy*, Wear 300 (2013): 8–19.
- [15] ULUTAN D., OZEL T. *Machining Induced Surface Integrity in Titanium and Nickel Alloys: a Review*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 51 (2011): 250–280.
- [16] YAZID M. Z. A., CHEHARON C. H., GHANI J. A., IBRAHIM G. A., SAID A.Y. M. *Surface Integrity of Inconel 718 when Finish Turning with PVD Coated Carbide Tool under MQL*, Procedia Engineering 19 (2011): 396 – 401.