

Zwiększanie wydajności szlifowania CFG stopów lotniczych Inconel

Improving the efficiency of Creep Feed Grinding aircraft Inconel alloys

ŁUKASZ ŻYŁKA*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.603

Procesem często stosowanym w wytwarzaniu części lotniczych jest szlifowanie CFG. W pracy przedstawiono sposoby poprawy wydajności szlifowania stopów Inconel. Przebadano proces obciążania ściernicy, różne materiały ściernicze, strategie szlifowania oraz sposób doprowadzenia chłodziwa i określono warunki obróbki zapewniające poprawę wydajności.

SŁOWA KLUCZOWE: szlifowanie, CFG, wydajność szlifowania, stop Inconel

CFG is a process which is often used in the manufacture of aircraft parts. The paper presents ways to improve efficiency of grinding Inconel alloys. There were tested grinding wheel dressing, different abrasives, grinding strategies and the methods of delivering coolant and determined machining conditions which ensuring efficiency improvement.

KEYWORDS: grinding, CFG, grinding efficiency, Inconel alloy

Materiałem często stosowanym na konstrukcję łopatek silników lotniczych narażonych na działanie wysokich temperatur są stopy na osnowie niklu, do których zalicza się m.in. stop Inconel 718. Skład chemiczny tego stopu jak i właściwości fizyczne i mechaniczne wpływają negatywnie na jego skrawalność i szlifowalność [6, 10, 15]. Bardzo często toczenie, frezowanie bądź przeciąganie stopu Inconel jest zbyt kosztowne i czasochłonne, dlatego też techniki te zastępowane są zazwyczaj szlifowaniem [10, 17].

Z uwagi na bardzo złą szlifowalność stopu Inconel 718 najczęściej stosowaną odmianą jego szlifowania jest szlifowanie głębokie z posuwem pełzającym zwane CFG (Creep Feed Grinding) [12, 15]. Proces ten charakteryzuje się dużymi wartościami głębokości szlifowania a_e , które osiągają wartości rzędu kilku a nawet kilkunastu milimetrów [10, 18] i wolnym posuwem v_w o prędkości ok. 1 mm/s. Pomimo szlifowania z tak niewielkim posuwem proces ten pozwala uzyskać stosunkowo dużą wydajność obróbki.

Jednakże występowanie dużych wartości głębokości szlifowania powoduje powstawanie dużej strefy styku ściernicy z materiałem obrabianym a co za tym idzie wzrost składowych siły szlifowania, mocy szlifowania jak również ciepła generowanego w strefie szlifowania [10, 15, 18]. Powoduje to zwiększone ryzyko powstawania przypaleń szlifierskich i utraty stabilności procesu szlifowania, szczególnie w przypadku próby zwiększania wydajności szlifowania.

Wzrost wydajności szlifowania realizowany jest zazwyczaj poprzez wzrost wartości parametrów technologicznych szlifowania. W rezultacie rośnie pole przekroju szlifowanej warstwy, wzrastają siły szlifowania i energetyczne obciążenie szlifowanej powierzchni [10]. Jednakże wydajność procesu szlifowania zależy od wielu czynników:

- charakterystyki ściernicy,
- parametrów i strategii obciążania ściernicy,

- parametrów i strategii szlifowania,
- warunków doprowadzenia chłodziwa.

Odpowiedni dobór ściernicy, parametrów i strategii obciążania oraz szlifowania jak i warunków chłodzenia może prowadzić do obniżenia składowych siły szlifowania [13, 14]. Dzięki temu możliwe jest zwiększenie wydajności szlifowania bez ryzyka uszkodzenia szlifowanej powierzchni.

Charakterystyka ściernicy

Jednym z czynników wpływającym na wydajność szlifowania jest charakterystyka ściernicy. W szlifowaniu CFG stosuje się ściernice miękkie o otwartej strukturze i średniej wielkości ziarna, lecz wykonane z różnych ziaren ściernych spajanych zazwyczaj spoiwem ceramicznym. To właśnie wybór odpowiedniego ziarna ściernego bądź mieszanki różnych ziaren ściernych wpływa głównie na proces szlifowania CFG. W zależności od zastosowanego rodzaju ziarna ściernego mogą dominować różne formy zużycia ściernicy, a to z kolei będzie determinować okres trwałości narzędzia. Biorąc powyższe pod uwagę przeprowadzono badania doświadczalne procesu szlifowania CFG stopu Inconel 718 z zastosowaniem trzech ściernic różniących się procentową zawartością ziaren z elektrokorundu i korundu spiekanego Cubitron [20]. W tablicy I przedstawiono charakterystykę zastosowanych ściernic.

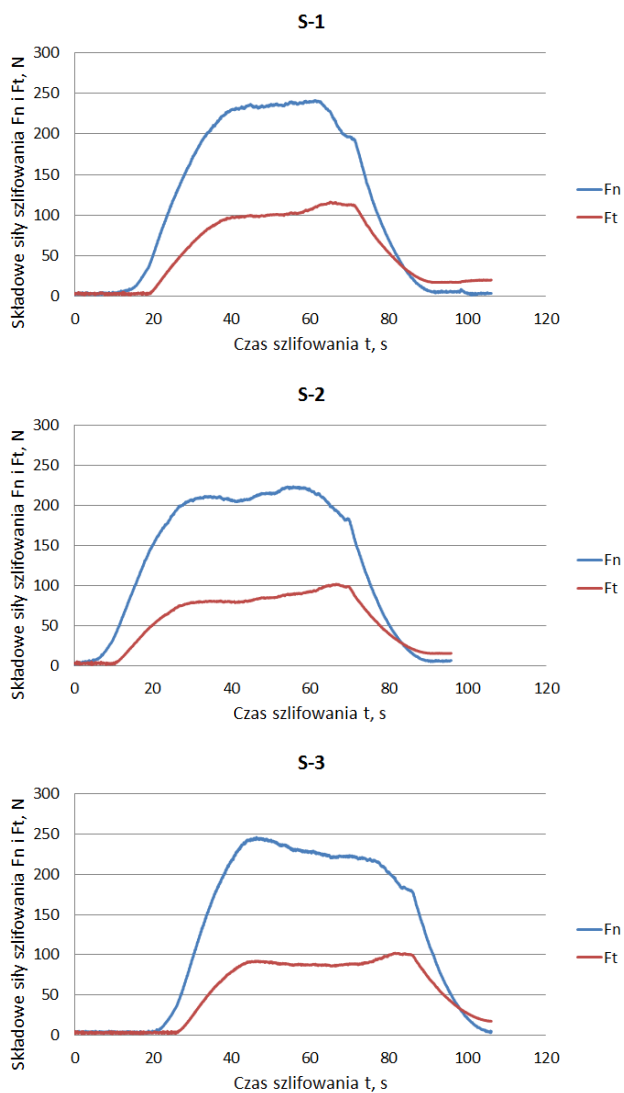
TABLICA I. Charakterystyka ściernic

Oznaczenie	Symbol ściernicy	Udział ziaren Al_2O_3	Udział ziaren Cubitron
S-1	99AX80H14VE01N	100 %	-
S-2	9A50X80H14VE01N	50 %	50 %
S-3	100X80H14VE01N	-	100 %

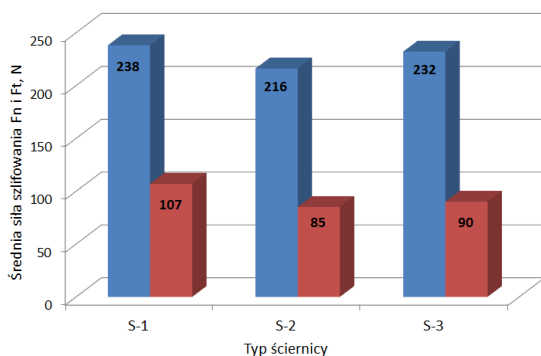
Badania prowadzono z stałymi warunkami obróbki ($a_e=1\text{mm}$, $v_w=50\text{mm/min}$, $v_s=25\text{m/s}$). Po każdym przejściu ściernica była obciążana. Dla każdej ściernicy mierzono przebieg składowych siły szlifowania w trakcie jednego przejścia. Przebiegi czasowe przedstawiono na rys. 1, natomiast na rys. 2 zestawiono wartości średnie sił szlifowania dla każdej ze ściernic.

Z rys. 1 i 2 wynika, że najmniejsze wartości siły szlifowania uzyskano w przypadku szlifowania ściernicą zawierającą zarówno ziarna elektrokorundowe jak i korundu spiekanego w proporcji 50/50. W porównaniu do ściernic S-1 i S-2 zanotowano spadek siły o ok. 10%. Zaznaczyć trzeba również, że dla każdej z zastosowanych ściernic proces szlifowania przebiegał stabilnie. Wnioskować należy, że aby zwiększyć wydajność procesu szlifowania CFG należy stosować ściernice zawierające mieszankę różnych rodzajów ziaren ściernych. Połączenie różnych właściwości oraz różnych form zużycia ziaren Al_2O_3 i Cubitron skutkuje niższymi siłami szlifowania. Dzięki temu możliwe jest zwiększenie parametrów procesu szlifowania bez ryzyka uszkodzenia termicznego szlifowanej powierzchni.

* dr inż. Łukasz Żyłka (zylka@prz.edu.pl) – Politechnika Rzeszowska



Rys. 1. Przebieg składowych siły szlifowania F_t i F_n w czasie jednego przejścia dla ściernic S-1, S-2 i S-3



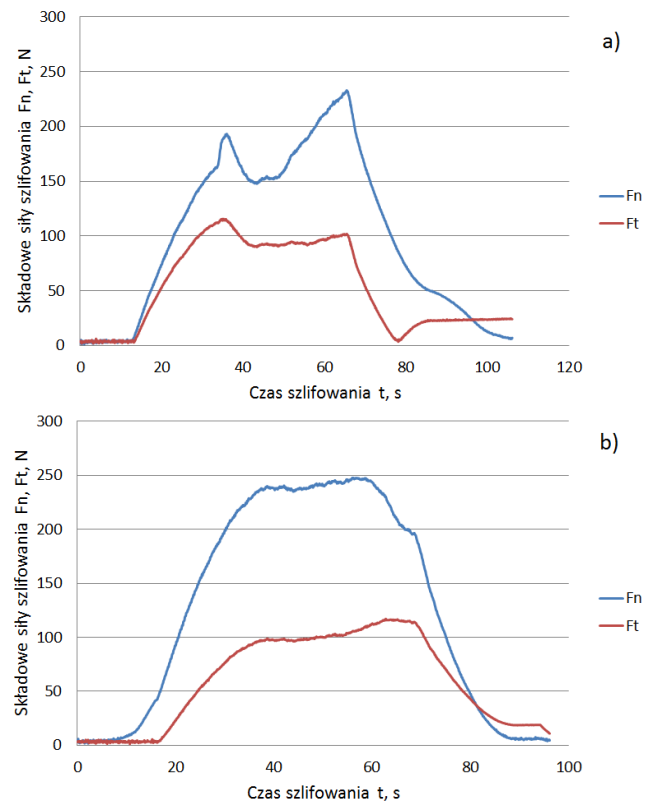
Rys. 2. Porównanie składowych siły szlifowania F_t i F_n

Strategia szlifowania CFG

Szlifowanie CFG, jak każda inna odmiana obróbki ścierniczej może być realizowane współbieżnie bądź przeciwbieżnie. W przypadku klasycznych odmian szlifowania stosuje się zazwyczaj strategię przeciwbieżną. Natomiast w szlifowaniu głębokim stopów Inconel (zbliżonym kinematycznie do procesu frezowania) stosowanie strategii przeciwbieżnej jest dyskusyjne. Na korzyść strategii przeciwbieżnej przemawiają przede wszystkim niższe siły szlifowania oraz lepsza jakość powierzchni wynikająca z innego niż w szlifowaniu przeciwbieżnym sposobu zagłębienia ziarna ściernego w materiał obrabiany [10]. Jednakże

główną przewagą szlifowania współbieżnego nad przeciwbieżnym jest korzystny rozkład strefy wpływu ciepła na obrabiany materiał. Strumień ciepła wytworzony podczas szlifowania współbieżnego nie przedostaje się do powierzchni obrabianej jak to ma miejsce w szlifowaniu przeciwbieżnym, lecz ewakuowany jest poza strefę szlifowania wraz z chłodziwem i wiórami, co zmniejsza ryzyko uszkodzenia termicznego warstwy wierzchniej [10]. Ma to również związek z różnicami w doprowadzeniu chłodziwa w obu strategiach szlifowania. Na korzyść szlifowania współbieżnego przemawia fakt, iż chłodziwo dostarczane jest do miejsca styku ziaren ściernych z szlifowaną powierzchnią, gdzie występuje największy przekrój szlifowanej warstwy. Gwarantuje to szybszą ewakuację ciepła.

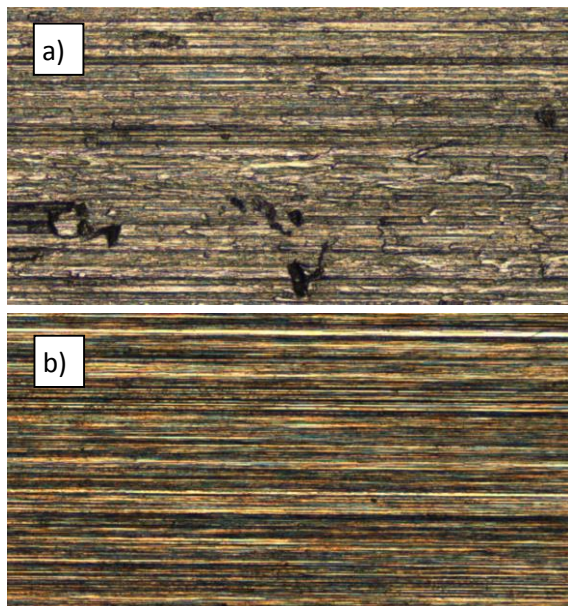
W celu potwierdzenia rozważań teoretycznych przeprowadzono próby szlifowania CFG stopu Inconel 718 stosując strategię przeciwbieżną i współbieżną. Badania prowadzono z stałymi warunkami obróbki ($a_e=1\text{mm}$, $v_w=50\text{mm/min}$, $v_s=25\text{m/s}$) [19]. W każdej próbie szlifowania mierzono przebieg składowych siły szlifowania oraz analizowano jakość powierzchni po obróbce. Na rys. 3 przedstawiono przebiegi czasowe składowych siły szlifowania podczas jednego przejścia, natomiast na rys. 4 pokazano widok w powiększeniu szlifowanych powierzchni.



Rys. 3. Przebieg składowych siły szlifowania F_t i F_n w czasie jednego przejścia w szlifowaniu: a) przeciwbieżnym i b) współbieżnym

Przebieg składowych siły szlifowania dla strategii przeciwbieżnej jest zakłócony. Zaobserwować można, że na początku i na końcu szlifowania siły znacznie wzrastają, natomiast w części środkowej siły maleją. Tak duże wahania wartości sił świadczą o niestabilnym przebiegu szlifowania, co potwierdza widok szlifowanej powierzchni na rys. 4a. Zaobserwować można plastyczne płynięcie materiału obrabianego, co zapewne wynikało ze zbyt wysokiej temperatury panującej w strefie szlifowania oraz liczne uszkodzenia powierzchni. Dokonano również pomiaru naprężeń własnych w warstwie wierzchniej. Powierzchnia szlifowana współbieżnie posiadała naprężenia ściskające na poziomie ok. 600 MPa,

natomiast w powierzchni po szlifowaniu przeciwbieźnym odnotowano naprężenia znacznie wyższe, ok. 1000 MPa.

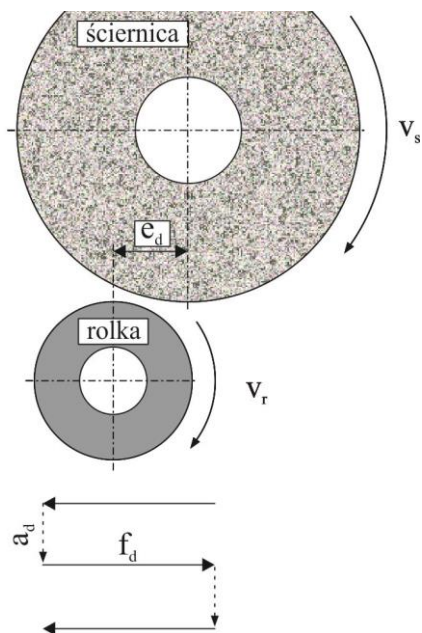


Rys. 4. Widok powierzchni po szlifowaniu: a) przeciwbieźnym, b) współbieżnym

Z przeprowadzonych badań wynika, że z uwagi na stabilność procesu szlifowania oraz jakość szlifowanej powierzchni należy stosować strategię szlifowania współbieżnego. Ponadto strategia ta zapewnia względnie stałą wartość siły podczas szlifowania.

Proces obciążania ściernicy

Szlifowanie CFG stopu Inconel ma zastosowanie głównie do obróbki powierzchni kształtowych, powierzchni zamka łopatki silnika lotniczego. W takim przypadku ściernica musi posiadać zarys odpowiadający zarysowi zamka, który kształtowany jest w procesie obciążania kształtową rolką diamentową. Z uwagi na ten fakt przebadano proces obciążania takim obciążaczem kształtowym i określono wpływ parametrów obciążania na przebieg szlifowania stopu Inconel 718. Kinematykę procesu obciążania przedstawiono na rys. 5.



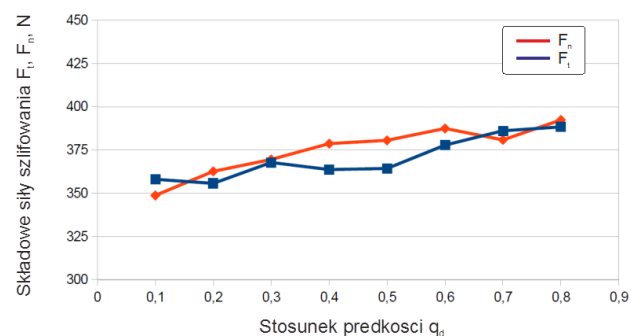
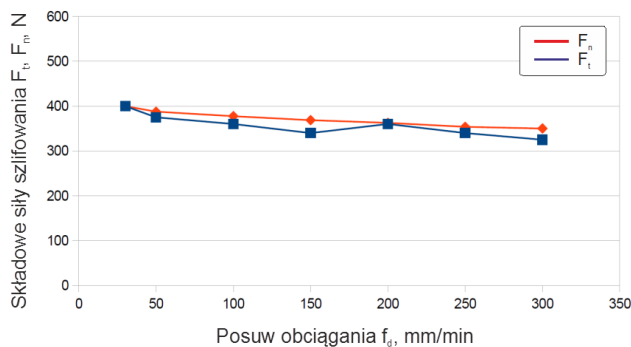
Rys. 5. Kinematyka procesu obciążania

Przebadano wpływ parametrów posuwu obciążania f_d oraz ilorazu prędkości q_d ściernicy i obciążacza wyrażonego zależnością:

$$q_d = \frac{v_s}{v_r}, \quad (1)$$

gdzie: v_s – prędkość obwodowa ściernicy; v_r – prędkość obwodowa obciążacza rolkowego.

Przeprowadzono próby szlifowania zmieniając parametry obciążania. Podczas obróbki rejestrowano składowe siły szlifowania oraz oceniano jakość powierzchni. Wyniki zaprezentowano na rys. 6.



Rys. 6. Zmiana składowych sił szlifowania w zależności od parametrów obciążania.

Z przedstawionych zależności wynika, że zwiększanie wartości posuwu powoduje niewielki spadek siły szlifowania. Z uwagi na to powinno się stosować jak największe prędkości posuwu jednakże parametrem ograniczającym może być chropowatość szlifowanej powierzchni. W rozpatrywanym przypadku najniższą chropowatość szlifowanej powierzchni uzyskano obciążając ściernicę z posuwem 100÷150 mm/min. Znacznie większy wpływ na wartości składowych sił szlifowania wywiera parametr q_d . Im większa wartość ilorazu q_d tym większe siły szlifowania. Jednakże wraz ze wzrostem sił szlifowania maleje chropowatość szlifowanej powierzchni. W związku z tym dobierając wartość parametru q_d należy wziąć pod uwagę nie tylko minimalną wartość sił szlifowania lecz również chropowatość powierzchni.

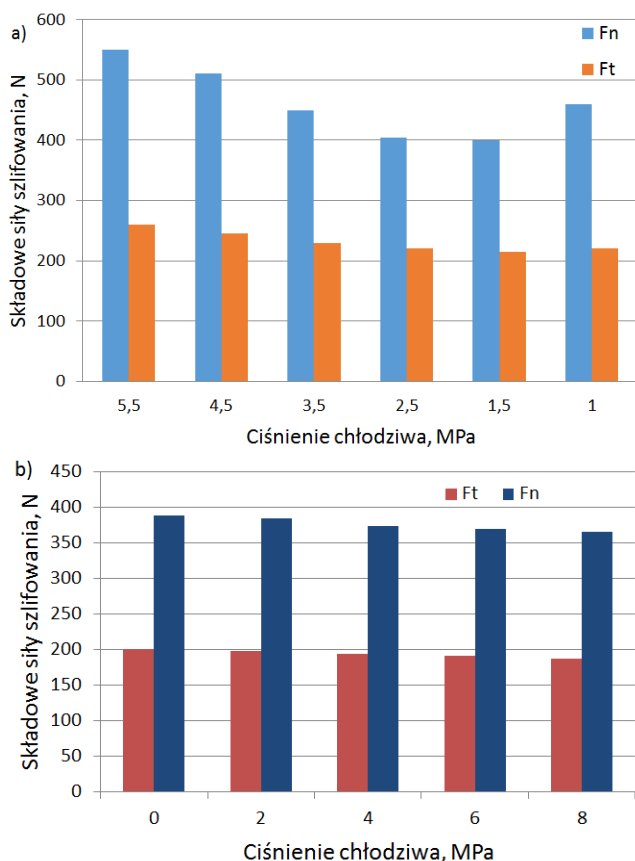
Doprowadzenie chłodziwa

Chłodziwo odgrywa kluczową rolę w procesie szlifowania, gdyż odpowiedzialne jest za ewakuację ciepła ze strefy szlifowania. Odpowiednie jego doprowadzenie do procesu szlifowania zapewnia stabilny przebieg obróbki, a w niektórych przypadkach nawet obniżenie wartości składowych sił szlifowania, czyli umożliwienie zwiększenia wydajności [1, 3, 4, 7, 8, 11].

Ze względu na duże wartości dosuwu szlifowania, w szlifowaniu CFG coraz częściej stosuje się dodatkowo dyszę czyszczącą ściernicę, która ma za zadanie oczyszczanie porów ściernicy za pomocą strumienia chłodziwa [5, 9, 16]. W związku z tym przebadano wpływ ciśnienia chłodziwa w dyszy chłodzącej oraz czyszczącej na wartość składowych sił szlifowania [2]. Wyniki pomiarów zaprezentowano na rys. 7.

Z przeprowadzonych badań wynika, że ciśnienie chłodziwa ma znaczący wpływ na wartość składowych siły szlifowania. Najmniejsze siły szlifowania odnotowano dla ciśnienia chłodziwa 3,5÷4,5 MPa, co odpowiadało prędkości wypływu chłodziwa zbliżonej do prędkości szlifowania. Zgodność prędkości chłodziwa i ściernicy powoduje, że chłodziwo wypełnia pory ściernicy i transportowane jest do strefy szlifowania i nie odbija się od poduszki powietrznej otaczającej ściernicę, jak ma to miejsce przy większych wartościach ciśnień.

Ponadto zauważono, że w przypadku czyszczenia ściernicy nie ma ograniczeń, co do ciśnienia chłodziwa. Im wyższe ciśnienie chłodziwa tym mniejsze wartości składowych siły szlifowania. Należy jednak wziąć pod uwagę fakt, iż strumień chłodziwa z dyszy czyszczącej skierowany jest prostopadłe do powierzchni ściernicy, co w przypadku stosowania większych ciśnień może prowadzić do niszczenia spoiwa i wypłukiwania ziaren ściernych (uszkodzeń CPS).



Rys. 7. Zmiany składowych siły szlifowania w funkcji ciśnienia chłodziwa w dyszy: a) chłodziwej, b) czyszczącej

Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań doświadczalnych wynika, że wydajność procesu szlifowania CFG stopów lotniczych Inconel jest zależna od wielu czynników. Obniżenie składowych siły szlifowania, a co za tym idzie możliwość zwiększenia wydajności można uzyskać poprzez:

- odpowiedni dobór mieszanki materiału ściernego,
- wybór strategii szlifowania współbieżnego,
- zwiększanie posuwu obciążania oraz zmniejszanie ilorazu prędkości ściernicy i obciążacza rolkowego,
- dostosowanie prędkości wypływu chłodziwa do prędkości szlifowania
- zastosowanie procesu czyszczenia ściernicy podczas obróbki z jak największym ciśnieniem chłodziwa.

Przedstawione wyniki uzyskano w badaniach procesu szlifowania CFG stopu Inconel 718, który jest powszechnie

stosowany w lotnictwie. Zastosowano warunki badań zbliżone do warunków przemysłowych.

Podziękowanie

Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

LITERATURA

1. Adibi H., Rezaei S. M., Sarhan Ahmed A. D., Investigation on using high-pressure fluid jet in grinding process for less wheel loaded areas, *Int J Adv Manuf Technol* 70:2233–2240, 2014
2. Babiarz R., Żyłka Ł., Płodzień M.: Badania wpływu parametrów doprowadzenia chłodziwa na proces szlifowania CFG stopu Inconel. *Mechanik* nr 9/2014, CD, s. 1-3
3. Babiarz R., Żyłka Ł., Koncepcja budowy układu wysokociśnieniowego chłodzenia procesu szlifowania stopów lotniczych. *Mechanik* nr 9/2014, CD, s. 4-7
4. Baines-Jones V.A., Morgan M.N., Batako A.D., Brown E., Modelling and simulation of grinding fluid nozzles, The 6th International Conference on Manufacturing Research (ICMR08) Brunel University, UK, 9-11th September 2008
5. Baines-Jones V.A., Morgan M.N., Allanson D. R., Batako A.D.L, Grinding Fluid Delivery System Design - Nozzle Optimisation, Liverpool John Moores University
6. Grigoriev S. N., Starkov V. K., Gorin N. A., Krajni P., Kopač J., Creep-Feed Grinding: An Overview of Kinematics, Parameters and Effects on Process Efficiency, *Strojnicki vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 60(2014)4, 213-220
7. Gviniashvili V., Webster J., Rowe B., Fluid Flow and Pressure in the Grinding Wheel Workpiece Interface, AMTTREL School of Engineering, Liverpool John Moores University,
8. Gviniashvili V.K., Woolley N.H., Rowe W.B., Useful coolant flowrate in grinding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44 (2004) 629–636, Liverpool
9. Kapłonek W., Nadolny K.: Assessment of the grinding wheel active surface condition using SEM and image analysis techniques. *Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 35(2013)3, pp. 207-215, DOI: 10.1007/s40430-013-0018-x.
10. Malkin S., Changsheng G.: Grinding technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives. Industrial Press, 2008
11. Morgan M.N., Jackson A.R., Wu H., Baines-Jones V., Batako A., Rowe W.B., Optimisation of fluid application in grinding, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57 (2008) 363–366, Liverpool
12. Nadolny K.: A review on single-pass grinding processes. *Journal of Central South University of Technology*, 20(2013)6, pp. 1502-1509, DOI: 10.1007/s11771-013-1641-5.
13. Nadolny K., Plichta J., Sutowski P.: Regeneration of the grinding wheel active surface using high-pressure hydro-jet. *Journal of Central South University of Technology*, 21(2014)8, pp.3107-3118.
14. Oğuz Çolak: Investigation on Machining Performance of Inconel 718 under High Pressure Cooling Conditions. *Journal of Mechanical Engineering* 58(2012)11, 683-690.
15. Pei-Lum T.: Study on the grinding of Inconel 718, *Journal of Materials Processing technology* 55 (1995), pp. 421 – 426.
16. Płodzień M., Żyłka Ł., Babiarz R.: Konstrukcja i obliczenia dysz wysokociśnieniowych stosowanych w szlifowaniu CFG stopów lotniczych. *Mechanik* nr 9/2014, CD, s. 280-283
17. Sikora M., Lajmert P., Ostrowski D., Kruszyński B.: Szlifowanie stopów niklu na szlifierce kłowej do wałków. *Mechanik* nr9/2014, CD, s. 289-292
18. Winterthur Technology Group: Handbook Creep-feed and surface grinding.
19. Żyłka Ł., Babiarz R., Płodzień M.: Porównanie przeciwbieżnego i współbieżnego szlifowania CFG (Creep-Feed Grinding) stopu Inconel. *Mechanik* nr 9/2014, CD, s. 349-351
20. Żyłka Ł., Babiarz R., Płodzień M.: Wpływ procentowej zawartości ziaren Cubitron w ściernicach z ziarnami z elektrokorundu na przebieg i wynik procesu szlifowania CFG (Creep-Feed Grinding) stopu Inconel. *Mechanik* nr 9/2014, CD, s. 352-355