

	Organizatorzy: Politechnika Łódzka Wydział Mechaniczny	XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKI ŚCIERNEJ Łódź - Uniejów 09-11.09.2015	
	• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn		

Wpływ ciśnienia i kąta podawania strugi chłodziwa na proces szlifowania CFG stopu Inconel 718

The influence of pressure and the angle of coolant jet on CFG grinding of Inconel alloy

ŁUKASZ ŻYŁKA
ROBERT BABIARZ
MARCIN PŁODZIEN
RAFAŁ STASIŁO
ŁUKASZ GÓRECKI *

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.404

Istotną rolę w procesie szlifowania CFG stopu Inconel odgrywają warunki chłodzenia (konstrukcja dyszy oraz warunki wypływu cieczy z dyszy). Ważnym czynnikiem mającym wpływ na wynik procesu szlifowania jest ciśnienie chłodziwa i kąt pod jakim struga chłodziwa dostarczana jest do strefy szlifowana. Przeprowadzono badania doświadczalne szlifowania stopu Inconel 718 różnymi parametrami wypływu chłodziwa z dyszy i kątami ustawienia. Określono wpływ warunków chłodzenia na przebieg sił szlifowania i jakość szlifowanej powierzchni.

SŁOWA KLUCZOWE: szlifowanie, stop Inconel, cieczy chłodząco-smarujące, ciśnienie chłodziwa

An important role in the CFG grinding process of Inconel alloys perform cooling conditions (nozzle design and flow conditions of the coolant from the nozzle). An important aspect which affects the result of the grinding process are coolant pressure and an angle of coolant stream at which coolant is delivered into the grinding zone. Experimental studies on grinding of Inconel 718 alloy were conducted with different parameters of outflow of coolant from the nozzle and at different angles of coolant jet. The effect of cooling conditions on grinding forces and the quality of ground surface was defined.

KEYWORDS: grinding, Inconel alloy, grinding fluids, coolant pressure.

W ostatnich latach obserwuje się znaczący rozwój w za-

kresie stosowania nowych materiałów konstrukcyjnych, głównie na konstrukcje lotnicze, do których należą m.in. elementy konstrukcyjne skrzydeł i kadłuba samolotu, elementy zawieszenia oraz komponenty silników lotniczych. W przypadku tych ostatnich, zaznaczyć trzeba że pracują one w bardzo trudnych warunkach eksploatacyjnych, np. w bardzo wysokich temperaturach. Podzespołami silników narażonymi na duże obciążenia mechaniczne i termiczne są łopatki wirnika. Materiałem bardzo często stosowanym na konstrukcje łopatek silników lotniczych są stopy na osnowie niklu, do których zalicza się stop Inconel 718. Skład chemiczny tego stopu jak i właściwości fizyczne i mechaniczne wpływają negatywnie na jego skrawalność i szlifowalność [6, 10]. Bardzo często toczenie, zwornianie 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]. Proces ten charakteryzuje się dużymi wartościami głębokości szlifowania a_e , które osiągają wartości rzędu kilku mm [17, 18] i wolnym posuwem v_w o prędkości ok. 1 mm/s. Pomimo szlifowania z niewielkim posuwem proces ten pozwala uzyskiwać wysoką produktywność.

Pomimo wielu wymienionych zalet proces CFG posiada szereg wad. Duże wartości głębokości szlifowania powodują wzrost składowych sił szlifowania, mocy szlifowania jak również ciepła generowanego w strefie szlifowania [10, 16, 19]. Powoduje to zwiększone ryzyko powstawania przypaleń szlifierskich i utraty stabilności procesu szlifowania. Ryzyko to może być zredukowane poprzez stosowanie odpowiednich warunków chłodzenia strefy szlifowania, czyli odpowiednio

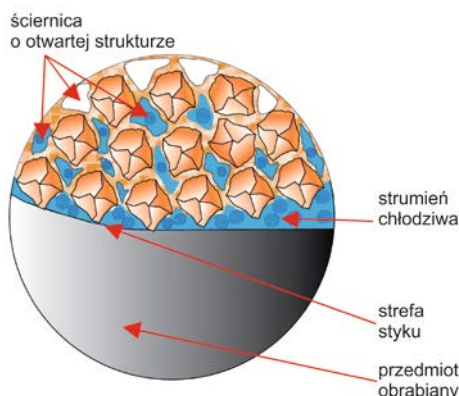
* dr inż. Łukasz Żyłka (zylka@prz.edu.pl), dr inż. Robert Babiarz (robertb@prz.edu.pl), mgr inż. Marcin Płodzien (plodzien@prz.edu.pl), inż. Rafał Stasiło (r.stasiło@gmail.com), inż. Łukasz Górecki (lumaclukasz@gmail.com)

dużych prędkości i wydatków strumienia chłodziwa oraz właściwego ustawienia tego strumienia względem ściernicy i przedmiotu obrabianego [2, 8, 11]. Od wielu lat prowadzone są badania doświadczalne z zakresu wysokociśnieniowego chłodzenia procesu szlifowania, w zakresie konstrukcji dysz chłodziwa oraz warunków jego doprowadzenia do strefy szlifowania [1, 4, 5, 7, 14, 15]. Nadal jednak brak jest kompleksowych badań dotyczących wysokociśnieniowego chłodzenia procesu szlifowania CFG stopów Inconel.

Chłodziwo w szlifowaniu CFG

Zastosowanie chłodziwa odgrywa bardzo ważną, jeżeli nie kluczową rolę w szlifowaniu, zwłaszcza stopów na osnowie niklu. Wynika to głównie z tego, że szlifowanie wymaga dużej ilości energii do usunięcia określonej ilości materiału. Ponieważ prawie cała energia dostarczona do procesu szlifowania jest zamieniana w energię cieplną generowaną w strefie szlifowania, musi ona zostać natychmiastowo odebrana przez chłodziwo aby zapobiec termicznemu uszkodzeniu szlifowanej powierzchni. Powoduje to, że zwłaszcza w szlifowaniu CFG występuje większe zapotrzebowanie na płyn chłodziwo-smarujący [10, 17]. Ponadto istotny jest sposób w jaki chłodziwo zostanie dostarczone do strefy szlifowania, z jakim wydatkiem i prędkością, jak ukształtowany będzie strumień chłodziwa i pod jakim kątem będzie doprowadzony w miejsce styku ściernicy z przedmiotem obrabianym, gdyż ma to wpływ na przebieg jak i wynik szlifowania CFG [2].

Podczas szlifowania ściernica obraca się ze znaczną prędkością, w związku z czym w pobliżu jej powierzchni czołowej wytwarza się cienka warstwa poduszki powietrznej, co powoduje dodatkowe trudności w dostarczaniu chłodziwa do porów ściernicy, a następnie transportowaniu go do strefy obróbki. Tylko ta część chłodziwa może chłodzić i smarować strefę szlifowania, która zostanie przetransportowana przez ściernicę do strefy jej styku z materiałem obrabianym (rys. 1). W szlifowaniu CFG stopów lotnicznych stosuje się ściernice o strukturze otwartej, co zapewnia transportowanie odpowiedniej ilości chłodziwa do strefy szlifowania.



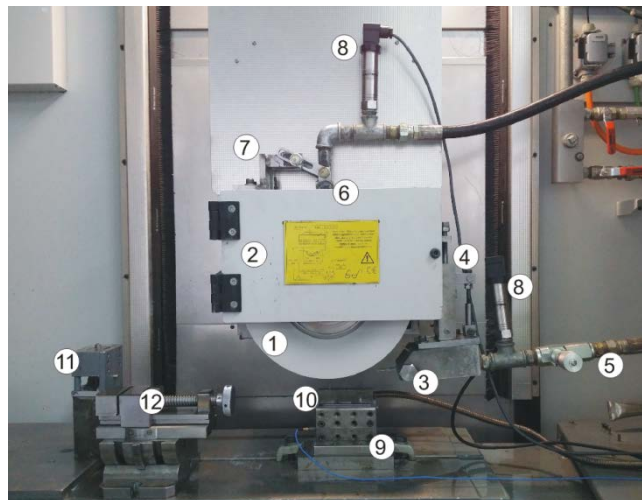
Rys. 1. Chłodziwo w strefie szlifowania [17]

Odpowiednia prędkość i kąt podawania strugi chłodziwa umożliwiają pokonanie poduszki powietrznej otaczającej ściernicę i efektywne chłodzenie i smarowanie. Niewłaściwe ustawienie kąta podawania chłodziwa oraz prędkości jego wypływu z dyszy mogą prowadzić do rozproszenia strugi chłodziwa przed strefą szlifowania lub odbijania części chłodziwa od ściernicy bądź szlifowanej powierzchni. W rezultacie do strefy szlifowania dostaje się mniejsza ilość cieczy obróbkowej powodując spadek wydajności chłodzenia i

smarowania, co w konsekwencji może skutkować przyspieszonym zużyciem ściernicy, wzrostem siły i mocy szlifowania a w skrajnych przypadkach powstawaniem uszkodzeń termicznych szlifowanych powierzchni [9, 13].

Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze została zbudowane na bazie szlifierki do szlifowania płaszczyzn i profili CNC FS 640Z firmy Geibel&Hotz. Szlifowano próbki wykonane z materiału Inconel 718 o wymiarach 15x50x50 mm, które zamocowane były w piezoelektrycznym siłomierzu (rys. 2).



Rys. 2. Widok przestrzeni roboczej szlifierki: 1) ściernica, 2) obudowa ściernicy, 3) dysza chłodziwa, 4) uchwyt dyszy, 5) zawór regulacyjny, 6) dysza czyszcząca, 7) uchwyt dyszy, 8) czujniki ciśnienia, 9) siłomierz, 10) próbka, 11) obciążacz, 12) imadło

Przeprowadzono próby szlifowania współbieżnego CFG w stałych warunkach przedstawionych w tabeli 1.

Tabela 1. Warunki badań

Ściernica	37A80H14 (korund + monokorund)		
Chłodziwo	emulsja syntetyczna AquaTec 7000		
Materiał obrabiany	Inconel 718		
Prędkość szlifowania	v_s	25	m/s
Dosuw szlifowania	a_e	1	mm
Prędkość posuwu	v_w	50	mm/min
Szerokość szlifowania	b	15	mm
Długość szlifowania	l	50	mm

W każdej próbie szlifowania dokonywano pomiaru składowych siły szlifowania F_n i F_t za pomocą piezoelektrycznego siłomierza 9121 firmy Kistler. Po szlifowaniu analizowano jakość powierzchni wykorzystując mikroskop optyczny 3D InfiniteFocus firmy Alicona. Pomiar chropowatości przeprowadzany był w dwóch punktach, na początku i na końcu próbki. Każda próba szlifowania poprzedzana była obciążaniem ściernicy w 5 przejściach z dosuwem obciążania $a_d = 0,02$ mm i prędkością posuwu obciążania $v_d = 200$ mm/min.

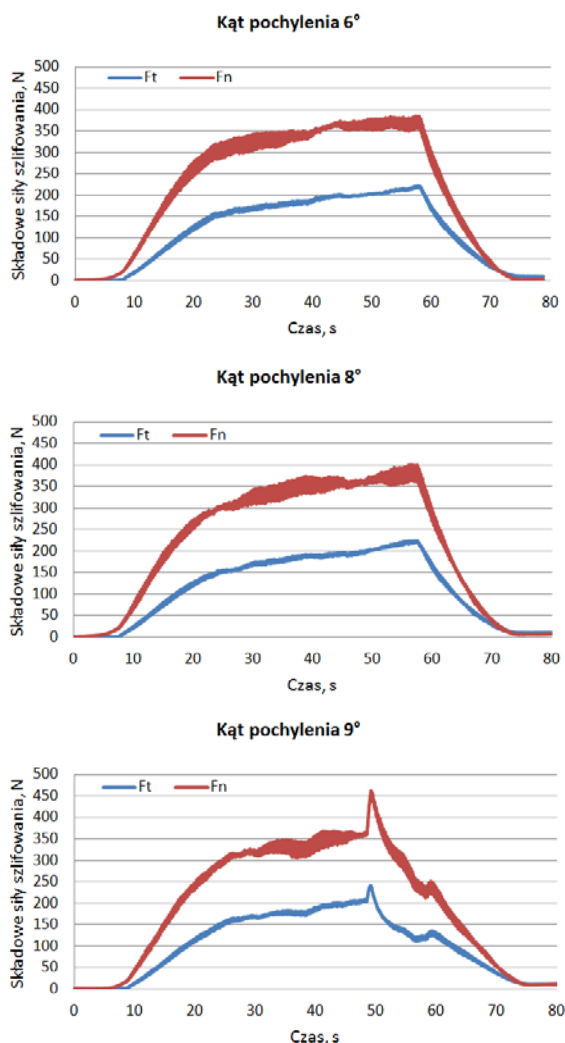
Wpływ kąta podawania strugi chłodziwa

Projektując i wykonując stanowisko badawcze opracowano przyrząd do precyzyjnego pozycjonowania dyszy chłodziwa, będący przedmiotem zgłoszenia patentowego P.409846, widoczny na rys. 3. Na rysunku przedstawiono

również sposób pomiaru i ustawiania kąta pochylenia dyszy chłodziwa względem szlifowanej powierzchni. Minimalna wartość kąta $\varphi = 6^\circ$ wynikała z ryzyka kolizji korpusu dyszy z szlifowanym przedmiotem. Zmieniano kąt φ w zakresie $6 \div 9^\circ$. Na rys. 4 przedstawiono przebiegi składowych siły szlifowania w trakcie jednego przejścia ściernicy.



Rys. 3. Ustawianie kąta pochylenia dyszy chłodziwa



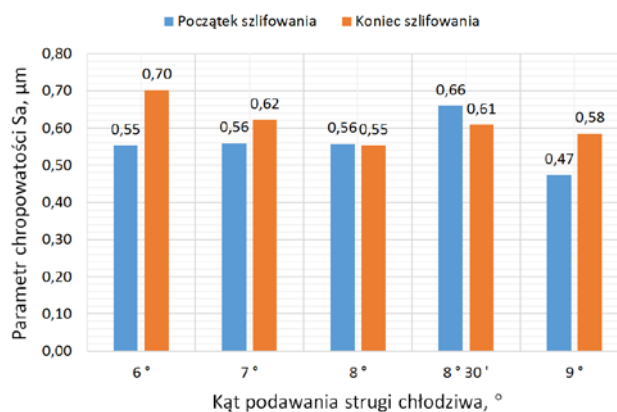
Rys. 4. Przebieg składowych siły szlifowania dla różnych wartości kąta pochylenia strugi chłodziwa

Zauważono, że dla kątów o wartości do 8° proces szlifowania przebiegał stabilnie a jakość powierzchni nie budziła zastrzeżeń. Dla większych kątów pochylenia strugi chłodziwa proces szlifowania stał się niestabilny, co skutkowało pojawieniem się przypalenia szlifierskiego w końcowym etapie szlifowania. Zjawisko można zaobserwować na wykresie przebiegu składowych siły szlifowania dla kąta 9° w postaci nagłego skoku i obniżenia siły. Zaistnienie tego zdarzenia trwale uszkodziło szlifowaną powierzchnię i jest zjawiskiem nieakceptowalnym, co przedstawia rys. 5.



Rys. 5. Widok próbki z przypaleniem szlifierskim

W zakresie kątów poniżej 8° proces szlifowania przebiegał bez zakłóceń a jakość powierzchni była niezależna od wartości kąta ustawienia dyszy chłodziwa (rys. 6). Wynika z tego, że głównym kryterium wyboru kąta ustawienia dyszy chłodziwa jest zapewnienie prawidłowego przebiegu procesu szlifowania, bez wad i zakłóceń.

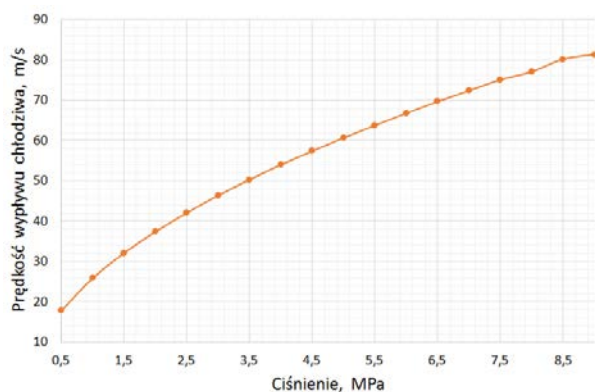


Rys. 6. Zmiana parametru S_a w funkcji kąta podawania strugi chłodziwa

Wpływ ciśnienia chłodziwa

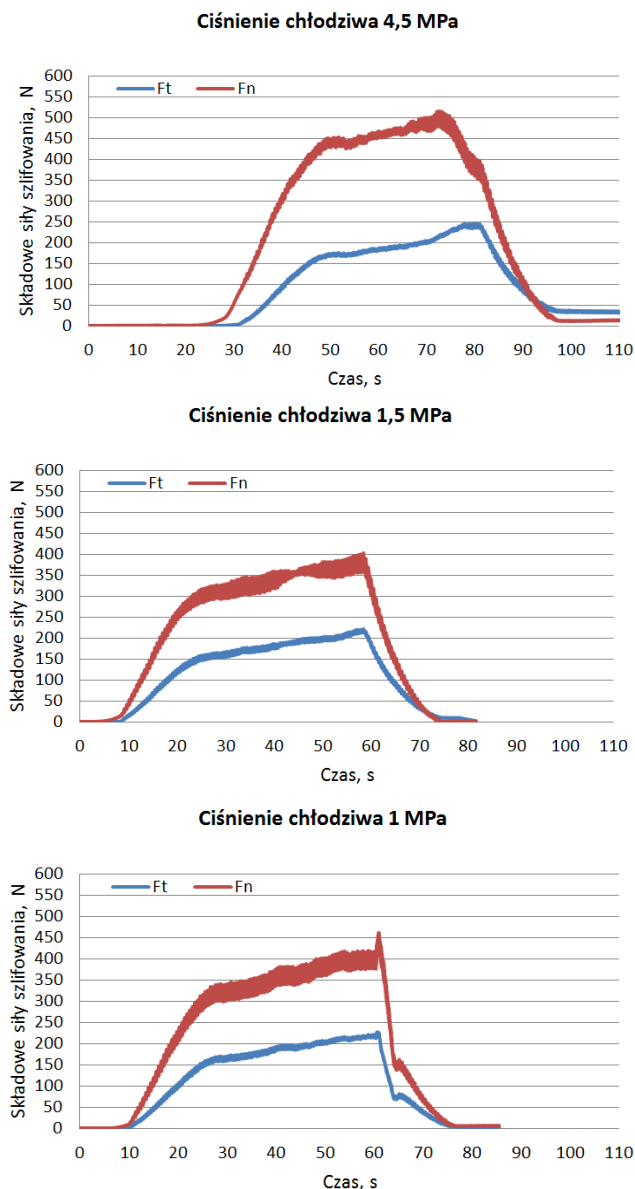
Kolejny etap badań polegał na określeniu wpływu ciśnienia chłodziwa, a dokładniej prędkości wypływu płynu z dyszy na przebieg procesu szlifowania CFG stopu Inconel. W tym celu wyposażono stanowisko badawcze w wysokociśnieniową pompę chłodziwa o maksymalnym ciśnieniu tłoczenia chłodziwa 12 MPa [3].

W pierwszym etapie wyznaczono charakterystykę zastosowanej dyszy chłodziwa za pomocą symulacji MES przeprowadzonych w systemie NX. Wyniki badań symulacyjnych zweryfikowano dokonując pomiaru wydatku chłodziwa dla dwóch wybranych wartości ciśnienia. Błąd badań symulacyjnych mieścił się w zakresie 5%. Charakterystykę przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Charakterystyka dyszy chłodziwa

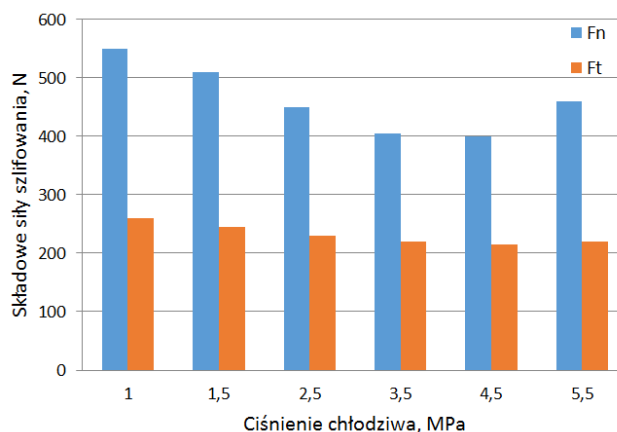
Przeprowadzono badania szlifowania z różnymi ciśnieniami chłodziwa na wlocie do dyszy. Badano ciśnienia chłodziwa w zakresie od 1 do 5,5 MPa. Na rys. 8 przedstawiono przebieg składowych siły szlifowania dla trzech wybranych ciśnień chłodziwa.



Rys. 8. Przebieg składowych siły szlifowania dla różnych wartości ciśnienia strugi chłodziwa

Analizując wszystkie przeprowadzone próby szlifowania stwierdzono, że proces szlifowania przebiega bez zakłóceń dla ciśnień chłodziwa większych od 1,5 MPa. Jednakże dla wyższych wartości ciśnień rzędu $3,5 \div 5,5$ MPa pojawiają się niewielkie zakłócenia szlifowania (krótkookresowe wahania wartości), które można zaobserwować na przebiegu składowych siły szlifowania. Pomimo tego zjawiska nie zaobserwowano widocznego uszkodzenia szlifowanej powierzchni. Dla ciśnienia chłodziwa 1 MPa, pod koniec szlifowania zaobserwowano nagły skok siły szlifowania a następnie spadek wartości, co świadczyło o uszkodzeniu termicznym szlifowanej powierzchni. Uszkodzenie to miało charakter taki sam jak przedstawione na rys. 5.

Następnie zestawiono ze sobą średnie wartości składowych siły szlifowania w funkcji ciśnienia chłodziwa (rys. 9). Zauważyć można, że najniższe wartości siły szlifowania występują, gdy prędkość wypływu chłodziwa jest zbliżona do prędkości szlifowania, bądź nieznacznie ją przewyższa. Prowadzi to do obniżenia siły szlifowania a jednocześnie zapewnia prawidłowy przebieg procesu szlifowania. Z drugiej strony zauważalny jest wzrost siły szlifowania w miarę zwiększania prędkości wypływu chłodziwa z dyszy.

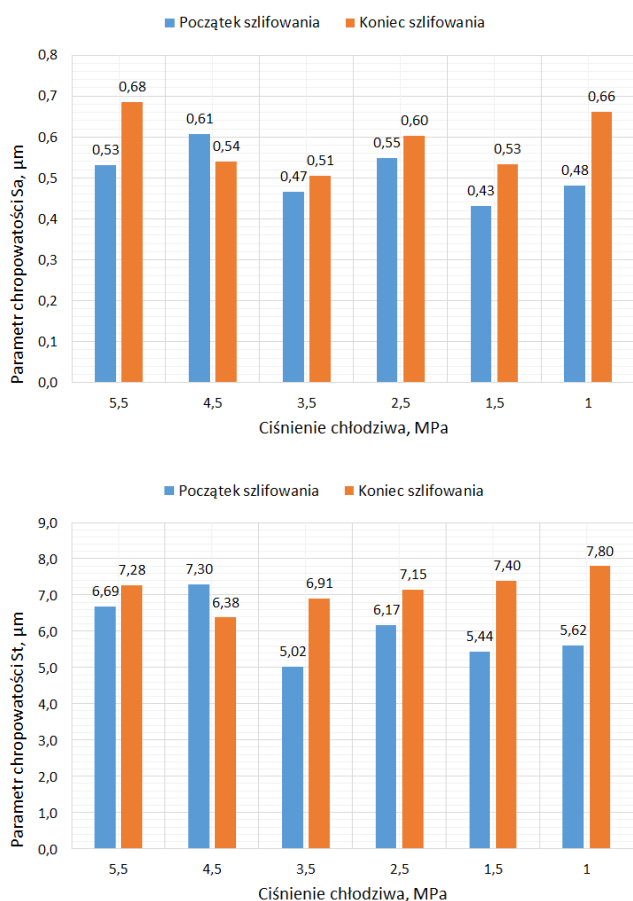


Rys. 9. Średnie wartości składowych siły szlifowania w funkcji ciśnienia chłodziwa

Zaobserwowany fakt można wytłumaczyć tym, że zbyt mała wartość ciśnienia chłodziwa prowadziła do obniżenia wydatku chłodziwa, co powodowało spadek efektywności odprowadzenia ciepła ze strefy szlifowania. W rezultacie powstały przypalenia szlifierskie. Duże wartości prędkości wypływu chłodziwa powodowały, że jego struga ulegała znacznemu rozproszeniu przed dotarciem do strefy szlifowania a ponadto z uwagi na prędkość znacznie przewyższającą prędkość obwodową ściernicy część chłodziwa odbijała się od ściernicy. W efekcie wzrastały siły szlifowania oraz energetyczne obciążenie szlifowanej powierzchni.

Analizie poddano również zużycie promieniowe ściernicy w każdej próbie szlifowania. Nie zaobserwowano jednak znacznej różnicy w wartościach zużycia promieniowego ściernicy dla różnych wartości ciśnienia chłodziwa. Zużycie promieniowe po jednym przejściu ściernicy mieściło się w zakresie $14 \div 15$ μm .

Następnie dokonano oceny jakości powierzchni po szlifowaniu z różnymi wartościami ciśnienia chłodziwa. Na rys. 10 przedstawiono zmianę parametrów S_a i S_t w funkcji ciśnienia chłodziwa.



Rys. 10. Wartości parametrów S_a i S_t w funkcji ciśnienia chłodziwa

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że wartość ciśnienia chłodziwa nie wpływa znacząco na chropowatość powierzchni po szlifowaniu. Dla większości przypadków chropowatość ulegała minimalnemu pogorszeniu pod koniec szlifowania. Ponadto dla ciśnień poniżej 3,5 MPa odnotowano wzrost parametru S_t pod koniec szlifowania.

Podsumowanie

Doprowadzenie chłodziwa do strefy szlifowania ma istotny wpływ na przebieg i wynik procesu szlifowania, zwłaszcza szlifowania CFG stopu Inconel. Warunki chłodzenia wpływają głównie na wartości składowych siły szlifowania oraz na stabilność obróbki. Właściwie dobrane parametry doprowadzenia cieczy obróbkowej do strefy szlifowania pozwalają na obniżenie siły szlifowania oraz zapobieganie powstawaniu przypaleń szlifierskich.

Z przeprowadzonych badań doświadczalnych wynika, że dla przyjętych warunków badań najkorzystniejszym kątem podawania strugi chłodziwa jest kąt w zakresie $6^\circ \div 8^\circ$. W zakresie tym proces szlifowania przebiega bez zakłóceń. Ponadto stwierdzono, że ciśnienie w układzie chłodzenia powinno zapewniać prędkość wypływu płynu z dyszy na poziomie zbliżonym do prędkości szlifowania. Gwarantuje to prawidłowy przebieg szlifowania, najniższe wartości składowych siły szlifowania i brak przypaleń szlifierskich. W tym celu konieczne jest jednak określenie charakterystyki zastosowanej dyszy chłodziwa.

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

- 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
- 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
- Babiarz R., Żyłka Ł., Konceptcja budowy układu wysokociśnieniowego chłodzenia procesu szlifowania stopów lotniczych. *Mechanik* nr 9/2014, CD, s. 4-7
- 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
- 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*
- 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, *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 60(2014)4, 213-220
- Gviniashvili V., Webster J., Rowe B., Fluid Flow and Pressure in the Grinding Wheel Workpiece Interface, *AMTTREL School of Engineering, Liverpool John Moores University*,
- 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*
- 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.
- Malkin S., Changsheng G.: Grinding technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives. *Industrial Press*, 2008
- 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*
- 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.
- 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.
- Oğuz Çolak: Investigation on Machining Performance of Inconel 718 under High Pressure Cooling Conditions. *Journal of Mechanical Engineering* 58(2012)11, 683-690.
- 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
- Sikora M., Lajmert P., Ostrowski D., Kruszyński B.: Szlifowanie stopów niklu na szlifierce kłowej do waków. *Mechanik* nr9/2014, CD, s. 289-292
- Winterthur Technology Group: Handbook Creep-feed and surface grinding.
- 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
- 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