

# Wybrane zagadnienia technologii obróbki skrawaniem materiałów lotniczych

## Some aspects of machining of aerospace materials

JOANNA KOSSAKOWSKA  
KRZYSZTOF JEMIELNIAK\*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.594

W niniejszym artykule przedstawiono cykl badań w zakresie opracowania technologii obróbki ubytkowej materiałów trudnoobrabialnych. Przedstawiono wyniki prac w zakresie optymalizacji toczenia zgrubnego Inconelu 625 oraz zastosowania narzędzi z płytkami obrotowymi do obróbki materiałów trudnoobrabialnych, takich jak stale stopowe, stop tytanu oraz Inconel 625.

**SŁOWA KLUCZOWE:** materiały trudnoobrabialne, skrawalność, narzędzia typu SPRT, Inconel 625, stopy tytanu

*This article presents a series of studies on the development of technology of machining of difficult to cut materials. The paper presents results for the optimization of rough turning Inconel 625 and for the application of the tools with rotating inserts for machining alloyed steels, titanium alloy and Inconel 625.*

**KEYWORDS:** difficult to machining materials, machinability, SPRT tools, Inconel 625, titanium alloys

### Wstęp

W przemyśle lotniczym często stosowane są trudnoobrabialne materiały jak stal nierdzewna, tytan, czy Inconel. Obróbka tych materiałów jest zagadnieniem stosunkowo nowym i stąd brakuje doświadczeń dotyczących najbardziej wydajnych, ekonomicznych warunków skrawania tych materiałów. Podejmowane są różne próby poprawienia wydajności skrawania tych materiałów, przy jednoczesnym zachowaniu trwałości ostrza w rozsądnych granicach.

W ramach niniejszego artykułu przedstawiono wyniki dwóch różnych badań w zakresie badania materiałów trudnoobrabialnych. Pierwsze z nich dotyczą wykorzystania narzędzi z płytkami obrotowymi do obróbki wykończeniowej materiałów trudnoobrabialnych. Drugie dotyczą doboru narzędzi i parametrów skrawania do toczenia zgrubnego Inconelu 625.

### Wykorzystanie narzędzi z płytkami obrotowymi do obróbki wykończeniowej materiałów trudnoobrabialnych

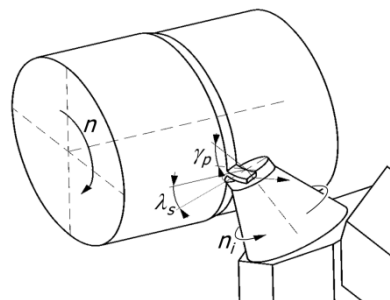
#### ■ Podstawy teoretyczne

Jednym z pomysłów na wydłużenie czasu skrawania pojedynczym ostrzem jest zastosowanie narzędzi z obrotowymi płytkami (RT – Rotary Tools). Idea działania narzędzi RT polega na skrawaniu specjalnie łożyskowaną płytką obrotową podlegającą ciąglemu obrotowi. Narzędzia RT dzielimy na narzędzia z samoobrotowymi ostrzami skrawającymi (SPRT – Self-Propelled Rotary Tools) lub ostrzami napędzanymi (DRT – Driven Rotary Tools). Pierwsze z nich znajdują się obecnie w ofercie firm komercyjnych, drugie są wciąż w sferze badań laboratoryjnych.

W narzędziach SPRT ruch obrotowy płytki wynika z interakcji między płytką a nacierającą na nią wiórem. Aby nastąpił ruch obrotowy, płytka musi być pod odpowiednim

kątem, zwanym kątem pochylenia między osią przedmiotu a osią narzędzia i oznaczanym  $\lambda_s$  (rys. 1).

Podstawową zaletą narzędzi RT jest ciągle dostarczanie „świeżej” krawędzi skrawającej i równomierne jej zużywanie na całym obwodzie płytki oraz „samochłodzenie” płytki wynikające z jej ruchu obrotowego. [1]. W [2, 3] wykazano bardzo dobrą odporność na ścieranie narzędzi SPRT podczas obróbki stali hartowanej. Redukcja temperatury narzędzia pozwoliła na eliminację zjawiska dyfuzji, co przełożyło się na równomierne zużycie powierzchni przyłożenia bez śladów zużycia na powierzchni natarcia [2]. Dzięki obrotowi płytki w narzędziach SPRT temperatura zostaje obniżona o ok. 50°C w stosunku do temperatury otrzymanej podczas obróbki w identycznych warunkach skrawania płytką nie obracającą się [4].



Rys. 1. Schematyczny model obróbki dla narzędzia typu SPRT

Ograniczeniem narzędzi z płytkami obrotowymi może być natomiast duża siła odporowa, charakterystyczna dla płytek okrągłych. Dlatego istotnym jest zadbanie o wystarczająco dużą sztywność układu narzędzie-przedmiot obrabiany, celem uniknięcia drgań samowzbudnych. [2]. Pomimo, że narzędzia typu SPRT są już komercyjnie dostępne i znane są przypadki ich skutecznego stosowania, zastosowanie tego typu narzędzi do obróbki wykończeniowej wciąż budzi wątpliwości. Obrotowa płytka z natury rzeczy będzie generowała więcej błędów ruchu niż płytka nie obracająca się. Dodatkowo mogą pojawić się drgania wskutek niskiej sztywności systemu obrotowemu płytki [5]. Ten właśnie aspekt omówiony zostanie w niniejszym artykule.

#### ■ Zakres badań

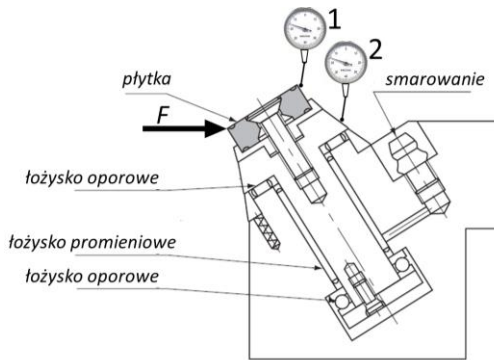
Do badań wykorzystano handlowo dostępne narzędzie typu SPRT ozn. RRS DL 2525M12 o kącie pochylenia krawędzi  $\lambda_s = -24^\circ$  oraz kącie natarcia  $\gamma_p = -24^\circ$ . Narzędzie wyposażone było w płytkę z węglika spiekane TF15 o średnicy 12.7mm. W ramach badań wykonano badania właściwości narzędzia (badania sztywności i bicia) oraz badania wpływu parametrów skrawania na jakość warstwy wierzchniej podczas toczenia stali nierdzewnej, stopu tytanu oraz Inconelu 625.

#### ■ Badania sztywności statycznej i bicia

Badania wykonano za pomocą czujnika zegarowego o działce elementarnej (Rys. 2). Podczas pomiarów sztywności statycznej płytka obciążana była siłą na kierunku składowej siły skrawania  $F_p$ . Pomiar wykonywane były w

\* dr inż. Joanna Kossakowska (j.kossakowska@wip.pw.edu.pl)  
prof. dr hab. inż. Krzysztof Jemielniak (k.jemielniak@wip.pw.edu.pl)  
Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Wytwarzania, Zakład  
Automatyzacji, Obrabiarek i Obróbki Skrawaniem

dwoch miejscach – na płytce (1) oraz na kołnierzu (2). Podczas pomiarów bicia pomiary wykonywano jedynie w miejscu (1), zaś ruch obrotowy płytki był wymuszany za pomocą przesuwania narzędzi wzdłuż osi przedmiotu obrabianego. Wyniki pomiarów sztywności narzędzia wykazały, że jest niska. Sztywność mierzone w punkcie 1 (na płytce), wynosiła tylko  $5,8 \text{ N}/\mu\text{m}$ . Z kolei sztywność uzyskana na kołnierzu była znacznie większa ( $26,4 \text{ N}/\mu\text{m}$ ). Oznacza to, że najłabszym punktem narzędzia jest mocowanie płytki. Z kolei bicie płytki wyniosło około  $0,04 \text{ mm}$ , co również jest niezadowalającym wynikiem, zwłaszcza przy obróbce wykończeniowej.



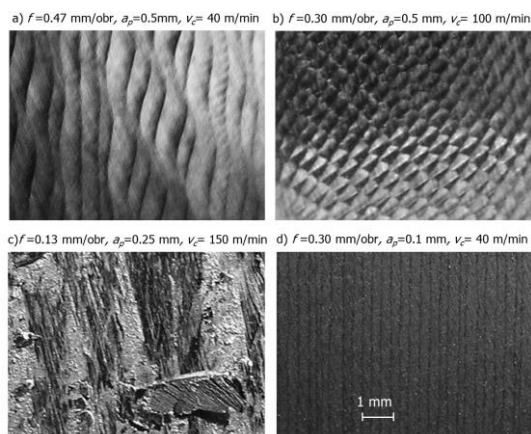
Rys. 2. Pomiary bicia i sztywności

### ■ Badanie jakości warstwy wierzchniej

Jakkolwiek niższe zużycie ostrza w narzędziach SPRT w porównaniu z narzędziami konwencjonalnymi można uznać za udowodnione przez różnych autorów, np [2, 3] o tyle w badaniach opisanych w niniejszym referacie za główne kryterium przydatności narzędzi była osiągalna jakość powierzchni obrabianej. Zjawiskiem mogącym mieć wpływ na niską jakość powierzchni mogą być wspomniane wyżej bicie oraz niska sztywność narzędzia. Z drugiej strony okrągłe płytki (zarówno obrotowe jak i konwencjonalne) mogą łatwo spowodować drgania samowzбудne układu obrabiarka-narzędzia-przedmiot obrabiany, jeśli nie ma on wytaczającej sztywności dynamicznej.

W ramach badań wykonano kompleksowe próby Przeprowadzono kompleksowy zestaw prób w celu oceny osiągalnej jakości powierzchni obrabianej z następującymi parametrami: prędkość skrawania: 40, 100 i 150 m/min, posuw 0.13, 0.3, 0.47 i 0.6 mm/obr oraz głębokość skrawania 0.1, 0.25, 0.35 i 0.5 mm podczas toczenia stali 15H11MF bez chłodziwa na tokarce konwencjonalnej TUD50.

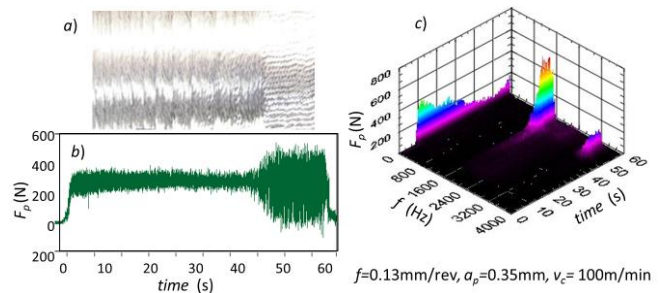
Na rys. 3 przedstawiono przykłady różnych powierzchni uzyskanych w wyniku toczenia wałka o średnicy ok. 132 mm, wykonanego ze stali 15H11MF.



Rys. 3. Przykłady powierzchni obrabianej a) falistość powstała na skutek drgań przedmiotu i bicia płytki, b) ślady po drganiach narzędzia, c) adhezja wiórów d) gładka, poprawna powierzchnia

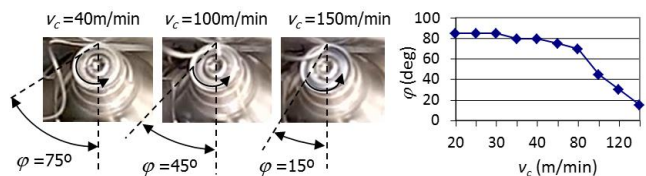
Rys. 3a przedstawia przykładową powierzchnię zawierającą charakterystyczną falistość, spowodowaną biciem płytki oraz drganiami przedmiotu. O ile bicie płytki nie da się wyeliminować, to zamocowanie sztywniejszego uchwyty przedmiotu mogłoby pozwolić na uniknięcie drgań przedmiotu obrabianego. Z kolei przykład powierzchni, zawierającej drgania o znacznie krótszej długości fali, przedstawia rys. 3b. Drgania te powstały na skutek drgania narzędzia.

Interesujący przypadek przedstawiono na rys. 4, gdzie niskoczęstotliwościowe oscylacje wynikające z bicia płytki powoli maleją, a w 43 sekundzie pojawiają się drgania samowzбудne narzędzia. Efekt tych zmian widać zarówno na powierzchni obrabianej, jak i na sygnale siły odporowej i jego widmie.



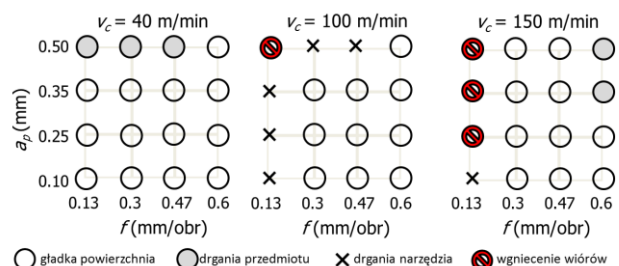
Rys. 4. Zmiany widoczne na powierzchni obrabianej, będące wynikiem rozwijających się drgań samowzбудnych narzędzia a) powierzchnia obrabiona, b) sygnał siły odporowej, c) Zmiany w czasie widma sygnału siły odporowej (STFT)

Z kolei na rys. 3c przedstawiono przykład najgorszej z uzyskanych powierzchni, z wieloma przywartymi do powierzchni wiórami. Zjawisko to występowało zwłaszcza przy wysokich prędkościach skrawania i niskich posuwach. Obserwacje filmu rejestrowanego podczas obróbki pod względem kierunku sływu wióra wykazały, że wraz ze wzrostem prędkości skrawania zmniejsza się kat sływu wióra  $\varphi$  (rys. 5). W konsekwencji wiór łatwiej ulegał zawijaniu pod wirującą płytkę i wgnieceniu w powierzchnię obrabianą. Zjawisko to można zniwelować przez zastosowanie większego posuwu.



Rys. 5. Zależność kierunku sływu wióra w zależności od prędkości skrawania;  $f=0.3 \text{ mm/obr}$ ,  $a_p=0.1 \text{ mm}$ .

Na rys. 6 zaprezentowano sumaryczny diagram przydatności badanego narzędzia SPRT do stali stopowej podczas obróbki na sucho w zależności od parametrów skrawania, stosując jako kryterium przydatności jakość uzyskanej powierzchni.



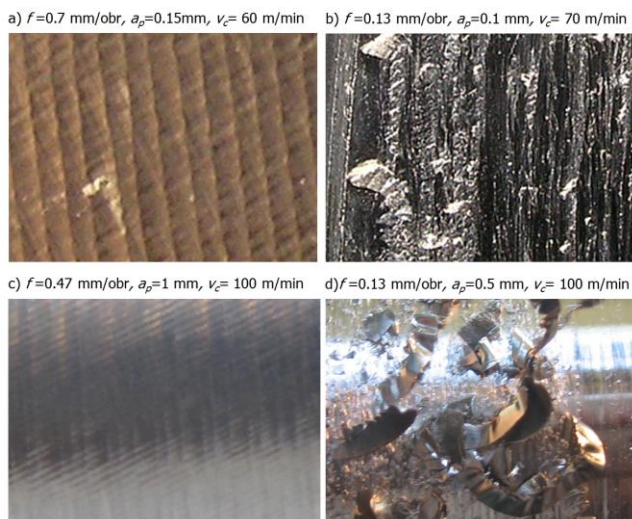
Rys. 6. Wyniki obróbki stali stopowej za pomocą narzędzia SPRT dla poszczególnych parametrów skrawania

Zastosowano tu cztery różne przypadki (por. rys. 3):

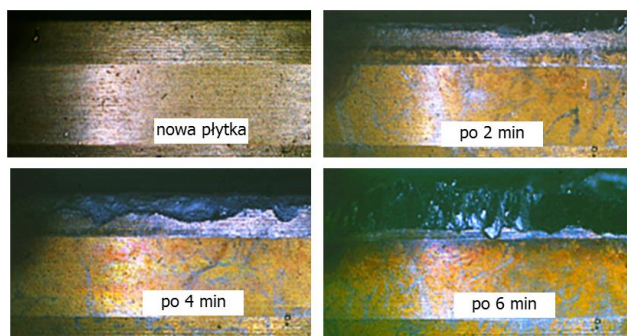
- Gładka, poprawna powierzchnia.
- Widoczne ślady po drganiach przedmiotu – te parametry byłyby użyteczne przy zastosowaniu sztywniejszego mocowania przedmiotu.
- Widoczne ślady po drganiach narzędzia – niezalecane zastosowanie narzędzia dla danych parametrów.
- Wióry wgniecione w powierzchnię obróbną - dyskwalifikacja zastosowania narzędzia dla danych parametrów.

Ostatnie zjawisko jest najgorszym z uzyskanych podczas badań i dyskwalifikuje zastosowanie badanego narzędzia SPRT w danym zakresie parametrów. Podobne efekty uzyskano podczas obróbki stopu tytanu Ti6Al4V oraz Inconelu 625 (rys. 7). Również w tym przypadku zjawisko to miało miejsce głównie przy obróbce z małymi posuwami. W przypadku zjawisko to można było w przypadku stopu tytanu ograniczyć stosując obfite chłodzenie. Najlepsze rezultaty osiągnięto dla średnich i dużych posuwów, średnich głębokości skrawania i wysokich prędkości skrawania.

Z kolei dla Inconelu 625 nie osiągnięto zadowalających efektów dla żadnych parametrów obróbki. Również okres trwałości ostrza był niezadowalający. Płytkę zużywała się nierównomiernie i już po ok. dwóch minutach osiągnęła wartość krytyczną (rys. 8).



Rys. 7. Przykłady powierzchni obrobionych uzyskanych w wyniku obróbki Inconelu 625 (a, b), stopu tytanu Ti6Al4V (c, d)



Rys. 8. Powierzchnia przyłożenia płytki w narzędziu SPRT w wyniku obróbki Inconelu 625,  $f = 0.3$  mm/obr,  $a_p = 0.5$  mm,  $v_c = 40$  m/min, toczenie czołowe z chłodziwem

#### ■ Podsumowanie

W ramach badań przeprowadzono kompleksowe badania w zakresie zastosowania handlowo dostępnych narzędzi typu SPRT do toczenia stopu stali stopowej 15H11MF. W wyniku badań wykazano ograniczenia związane z wykorzystaniem tych narzędzi do obróbki wykończeniowej. Najważniejszym z nich jest tendencja do zawijania przez

obracającą się płytkę i wgniatania wióra w powierzchnię obrobioną. Z kolei niska sztywność narzędzia oraz bicie występujące na płytce powoduje występowanie falistości na powierzchni obrabianej. Narzędzie posiada również tendencję do drgań wysokoczęstotliwościowych, zwłaszcza podczas obróbki przy niskich posuwach i wysokich prędkościach skrawania. W ramach badań wytypowano parametry skrawania, pozwalające na uzyskanie gładkiej powierzchni. Podobne zjawiska zauważono również podczas obróbki stopu Ti6Al4V i Inconelu 625.

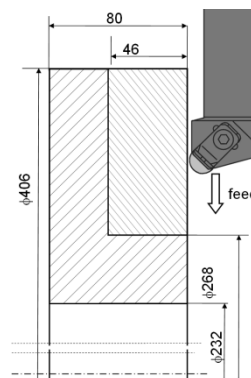
### Optimalizacja toczenia zgrubnego Inconel 625

#### ■ Podstawy teoretyczne

Od wielu lat obróbka żaroodpornych, trudnoobrabialnych materiałów poważny problem i jednocześnie jest obiektem badań wielu ośrodków badawczych. Superstopy bazujące na niklu, ze względu na wyjątkową odporność termiczną i utrzymywanie swoich właściwości mechanicznych w temperaturze nawet 700°C są szeroko stosowane w przemyśle lotniczym [6]. Materiały te są jednak trudne w obróbce ze względu na swoją wytrzymałość na ścinanie, tendencję do utwardzania, silnie ścierające cząsteczki węglików w mikrostrukturze oraz niską przewodność cieplną [7, 8]. O ile w przypadku Inconelu 718 występuje stosunkowo duża liczba publikacji, przedstawiająca wyniki badań w zakresie optymalizacji obróbki, o tyle liczba publikacji na temat obróbki Inconelu 625 jest znikoma i powierzchowna. Z drugiej strony szybko rozwijające się nowe materiały narzędziowe dają szansę na znaczne zwiększenie wydajności obróbki. Wybór między ofertami różnych producentów wymaga odpowiednich testów porównawczych, które są kosztowne i czasochłonne. Często nie są one prowadzone w warunkach produkcyjnych, lecz w laboratoriach współpracujących z przemysłem ośrodków akademickich, np. [9, 10]. Celem badań opisanych w niniejszym referacie była optymalizacja czołowego toczenia zgrubnego stopu bazującego na niklu – Inconelu 625. Założonym efektem badań był dobór narzędzi skrawających i parametrów skrawania umożliwiających jak najbardziej wydajną obróbkę. Do badań wytypowano cztery narzędzia różnych firm narzędziowych, dedykowane do obróbki materiałów żaroodpornych. Następnie wykonano szereg prób mających na celu wybranie narzędzia, umożliwiającego obróbkę z największą wydajnością przy zachowaniu optymalnego okresu trwałości ostrza. Brano przy tym pod uwagę mogącą wystąpić w praktyce produkcyjnej możliwość – brak bezstopniowej zmiany prędkości obrotowej wrzeciona i konieczność pracy ze stałymi obrotami przy zmiennej średnicy, czyli ze zmienną prędkością skrawania, co jest niekorzystne.

#### ■ Przedmiot badań i stanowisko badawcze

Przedmiotem obrabianym badań była tarcza z Inconelu 625 – przykładowy przedmiot stosowany w przemyśle lotniczym. Szkic przedmiotu przed i po obróbce przedstawiono na rys. 9.






Rys. 9. Szkic przedmiotu przed i po obróbce

Zadanie technologiczne polegało na wykonaniu zgrubnej operacji zmniejszenia średnicy przedmiotu z 406 do 268 mm na długości 46 mm licząc od czoła przedmiotu. Dotychczas operacja wykonywana była przy użyciu płytki typu CNM z węgliku spiekaneego z parametrami:  $n=45$  obr/min,  $f=0.2$  mm/obr,  $a_p=2.5$  mm. Badania przeprowadzono na tokarce TKX50N.

Przy wyborze narzędzia oraz parametrów skrawania należało uwzględnić takie czynniki jak właściwości materiału skrawającego oraz ograniczenia maszyny, wynikające z mocy obrabiarki, wielkości chwytu na narzędziu, wielkości odsadzenia, umożliwiającego skrawanie nad łozem. Zestawienie narzędzi wytypowanych do badań wraz zalecanymi parametrami przedstawiono w tabelicy 1. Dla narzędzia N1 sugeruje obróbkę ze zróżnicowaną głębokością skrawania dla poszczególnych przejść celem uniknięcia kumulacji karbowego zużycia ostrza. Producent narzędzia N3 z podobnych pobudek sugeruje stosowanie rampingu, tj. płynnie zmieniającej się głębokości w ramach jednego przejścia.

**TABLICA I. Zestawienie narzędzi do badań**

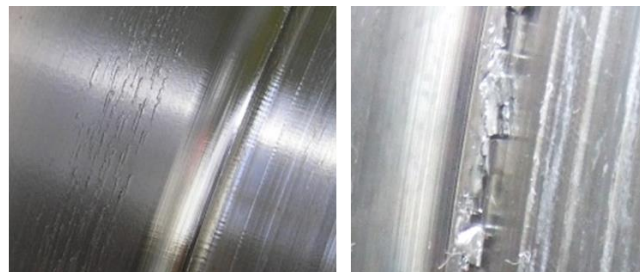
Nr narzędzia			
N1	N2	N3	N4
			
Oznaczenie oprawki			
DCKNL3225	CRGNL2525	CRSNL3225	CRSNL2525
Oznaczenie płytki i rodzaj materiału			
CNMG 120412	RNGN 20700 (faza)	RNGN 120700	RNGN 120700
Rodzaj materiału			
węglik spiekany	Ceramika azotkowa	Ceramika typu whiskers	Ceramika typu whiskers
Zalecane parametry 1) $v_c$ [m/min] 2) $f$ [mm/obr] $a_p$ [mm]			
$v_c = 70$ $f = 0,25$ $a_p = 3,5 / 2.8$	Brak danych	$v_c = 180-220$ $f = 0.25$ $a_p = 2-3$ ramping	$v_c = 200$ $f = 0.1-0.15$ $a_p = 2$

#### ■ Badania ze stałą prędkością skrawania

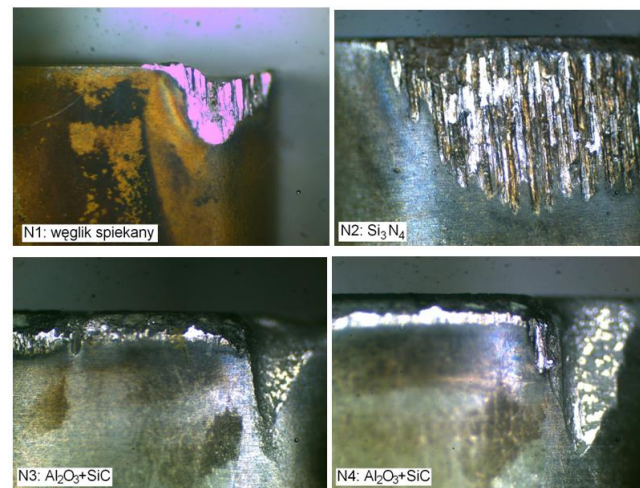
Badania te miały na celu dobór optymalnych parametrów skrawania (posuw, głębokość skrawania, prędkość skrawania) dla poszczególnych narzędzi. Należy tu podkreślić, że podczas tych badań pojedynczy zabieg toczenia poprzecznego był wykonywany ze stałą prędkością skrawania, czyli ze zmienną prędkością obrotową maszyny. Po wstępnym ustaleniu parametrów skrawania dla danego narzędzia, na podstawie zaleceń producenta, wykonywano pojedynczy zabieg toczenia poprzecznego. Jeśli zabieg przebiegał bez zakłóceń (np. nie wystąpiło katastroficzne stępienie ostrza, zatrzymanie maszyny na skutek przeciążenia) po zakończeniu zabiegu podejmowano decyzję o zdolności danego ostrza do dalszej pracy, czyli wykonania kolejnego zabiegu. Ponieważ charakter zużycia ostrza zmieniał się w zależności od rodzaju ostrza czy warunków skrawania – nie przyjęto jednego stałego kryterium stępienia ostrza, tylko za każdym razem analizowano szereg czynników dyskwalifikujących bądź dopuszczających narzędzie do dalszej obróbki. Obserwacji zatem podlegały zarówno bezpośrednie jak i niebezpośrednie wskaźniki zużycia ostrza. Jako niebezpośrednie kryteria stępienia ostrza i przyjęto drastyczne pogorszenie się jakości powierzchni obrobionej bądź powstanie wypływkę (rys. 10).

Wykonano szereg prób mających na celu wybranie narzędzia, umożliwiającego skrawania z największą wydajnością przy zachowaniu racjonalnego okresu trwałości ostrza.

Porównując pracę poszczególnych narzędzi należy zwrócić uwagę na różne sposoby zużywania się płytek (rys. 11). W przypadku ostrzy z węglików spiekanych N1 (rys. 11a), występowało silne zużycie kraterowe i starcie naroża. Narzędzie z ceramika azotkowa N2 zużywało się na powierzchni przyłożenia (rys. 11b), natomiast w narzędziach z ceramiki typu whiskers N3 i N4 (rys. 11c i d) dominowało zużycie wrębowe. Łącznie wykonano 13 prób narzędziami N1, 7 prób dla N2, 6 prób dla N3 i 3 próby dla N4.



Rys. 10. Pośrednie kryteria stępienia ostrza: chropowatość powierzchni i wypływka



Rys. 11. Postaci stępienia ostrzy wykorzystywanych narzędzi

Zestawienie optymalnych parametrów skrawania przy obróbce ze stałą prędkością skrawania przedstawiono w tabelicy II.

**TABLICA II. Zestawienie optymalnych parametrów skrawania ze stałą prędkością skrawania**

Nr	$v_c$ m/min	$a_p$ mm	$f$ mm/obr	Liczba przejść	Uwagi
N1	50	4	0.32	1	
N2	220	2.5	0.25	2	niekorzystne, wióry, obróbka niestabilna
N3	220	2.5	0.25	2-3	Wióry spiralne, obróbka lekko niestabilna
N4	220	2.5	0.2	3	Wióry korzystne, stabilna obróbka

W wyniku optymalizacji warunków skrawania uzyskano szacunkowy czas wykonania całej operacji w granicach 23-33 minuty. Analizując szacunkowy czas wykonania całej operacji przez narzędzia poszczególnych firm można zauważyć, że najlepszy czas obróbki osiągnięto dla N2 i N3. Biorąc pod uwagę trwałość ostrza, stabilność obróbki oraz postać wióra – najlepsze wyniki osiągnięto dla N4. Dlatego też narzędzia tych trzech firm zakwalifikowano do dalszych testów, ze stałą prędkością obrotową

### ■ Badania ze stałą prędkością obrotową

Uwzględniając ograniczenia wynikające z braku możliwości ustawienia dowolnej prędkości obrotowej oraz dopuszczalne wartości prędkości skrawania, określone przez poszczególnych producentów, postanowiono przeprowadzić badania także dla stałej prędkości obrotowej  $n=224$  obr/min dla narzędzi N2, N3 i N4 oraz  $n=196$  obr/min dla narzędzi N3. Dla płytki firmy N4 wykonano również toczenie ze zmienną głębokością skrawania, zwane rampingiem. Polega na wykonaniu jednego zabiegu ze wzrastającą bezstopniowo głębokością skrawania, np. w zakresie od 2 do 3 mm oraz drugiego zabiegu z malejącą głębokością skrawania w zakresie 3 – 2 mm. Ramping zastosowano jedynie dla narzędzi firmy N4 w celu potwierdzenia bądź wykluczenia celowości stosowania tej metody w niniejszym zastosowaniu. Badania ze stałą prędkością obrotową wykonano stosując zarówno chłodzenie jak i bez chłodzenia.

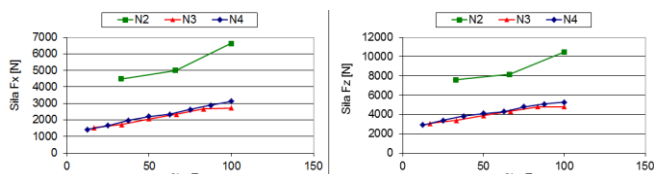
Podczas toczenia ze stałą prędkością obrotową mierzono siły skrawania w dwóch kierunkach za pomocą czujnika piezoelektrycznego firmy Kistler 9017B.

W tablicy III przedstawiono zestawienie uzyskanych trwałości ostrza. W wyniku badań niniejszych wykazano, że:

- W niniejszym zastosowaniu nie ma podstaw do skrawania na sucho; skrawanie z chłodziwem pozwoliło na uzyskanie nawet dwukrotnie wyższej trwałości ostrza w porównaniu ze skrawaniem na sucho. Potwierdzają do wyniki badań dla wszystkich trzech producentów narzędzi.
- W niniejszym zastosowaniu ramping nie przyniósł spodziewanych rezultatów
- Za pomocą narzędzi N2, N3 i N4 uzyskano podobną wydajność, która pozwala na uzyskanie czasu maszynowego wykonania operacji zasadniczego do ok. 27 minut.
- Najlepszym z testowanych materiałów w niniejszym zastosowaniu okazała się ceramika azotkowa typu Whiskers (N3 i N4), N3 pozwoliło na bezawaryjne wykonanie sześciu zabiegów, zaś od czterech do ośmiu zabiegów
- Zauważono również uwagę na wyraźnie wyższe siły skrawania dla narzędzia N2 (rys. 12), wynikające z fazywania płytki. Przekłada się to na wyższą moc skrawania, wyższą temperaturę w strefie skrawania i może pociągać za sobą niekorzystne zmiany warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego.

**TABLICA III. Zestawienie wyników badań ze stałą prędkością obrotową**

Nr	Chłodzenie	f mm/obr	n obr/min	$a_p$ mm	Liczba przebiegów
N2	TAK	0,21	224	2,5	3, 3
	NIE	0,21	224	2,5	2
N3	TAK	0,25	196	2,5	3
	NIE	0,21	224	2,5	3
N4	TAK	0,21	224	2,5	4, 4, 8, 8
	NIE	0,21	224	2,5	3
	TAK	0,21	224	2-3, 3-2	2



Rys. 12. Przebiegi wartości średnich sił w funkcji wykorzystanej części okresu trwałości ostrza

### ■ Podsumowanie

Zastosowanie okrągłych płytek z ceramiki typu whiskers umożliwiło zwiększenie średniej prędkości skrawania z 48 do 237 m/min przy zachowaniu czasu skrawania pojedynczym ostrzem na poziomie od 6 do 12 minut. Zakładając, że jedną płytką wykonywane będzie średnio 6 zabiegów, na wykonanie całej operacji wystarczą 3 ostrza, czyli jedna strona okrągłej płytki o promieniu 12 mm. W porównaniu z obecnymi warunkami skrawania pozwoliło to na pięciokrotne zwiększenie wydajności pracy przy jednoczesnym utrzymaniu kosztów zakupu płytek skrawających na podobnym poziomie.

### 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. Sasahara H. Kato A. Nakajima H. Yamamoto H. Muraki T. Tsutsumi M. „High-speed rotary cutting of difficult-to-cut materials on multitasking lathe” *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Nr 48 (2008): s.841+850
2. Kishawy HA, Wilcox J. „Tool wear and chip formation during hard turning with self-propelled rotary tools” *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Nr 43 (2003): s. 433+439
3. Hosokawa A. et al. „Turning of Difficult-to-Machine Materials with Actively Driven Rotary Tool” *CIRP Annals - Manufacturing Technology* Nr 59 (2010): s.89+92
4. Dessoly V., Melkote SN, Lescalier Ch. „Modeling and verification of cutting tool temperatures in rotary tool turning of hardened steel” *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Nr 44 (2004): s. 1463+1470
5. Ezugwu E. „Improvements in the machining of aero-engine alloys using self-propelled rotary tooling technique” *Journal of Materials Processing Technology* Nr. 185 (2007): s. 60+71
6. Balazinski, M. Songmene, V. „Improvement of tool life through variable feed billing of Inconel 600”. *CIRP Annals* Nr 44/1 (1995): s. 55+58.
7. Choudhury, I.A. Baradie, M.A. „Machinability of nickel-base super alloys. A general review” *J. of Materials Processing Technology*. Nr 77 (1998): s. 278+284
8. Dudzinski, A. et al. „A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy” *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Nr 44 (2004): s. 439+456.
9. Jemielniak, K., „Finish turning of Inconel 718”, *Advances in Manufacturing Science and Technology*. Nr 33/1 (2009): s. 59+69.
10. Jemielniak, K., „Rough turning of Inconel 718”, *Advances in Manufacturing Science and Technology* Nr 33/3 (2009): s: 5+15