

dr hab. inż. Janusz Porzycki, prof. PRz, e-mail: jpor@prz.edu.pl

dr inż. Witold Habrat, e-mail: witekhab@prz.edu.pl

mgr inż. Roman Wdowik, e-mail: rwdowik@prz.edu.pl

Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza

Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA SZLIFOWANIA ZE WSPOMAGANIEM ULTRADŹWIĘKOWYM W PRZEMYŚLE LOTNICZYM

Streszczenie: Istnieje potrzeba odpowiedzi na pytanie o możliwości zastosowania hybrydowych technik wytwarzania w przemyśle lotniczym. Znalezienie zastosowań takich procesów, do obróbki materiałów określanych jako trudno obrabialne, przy jednoczesnym wysokim prawdopodobieństwie ich wdrożenia, będzie podstawą do budowy zaawansowanych, specjalnych maszyn CNC oraz modernizacji maszyn konwencjonalnych.

THE POSSIBLE APPLICATIONS OF ULTRASONIC ASSISTED GRINDING IN AEROSPACE INDUSTRY

Abstract: There is the need to answer the question about the possible applications of hybrid processes in aerospace industry. The applications of these processes in machining of hard to machine materials when the probability of industrial applications is high is the base for building and modernization of advanced machines.

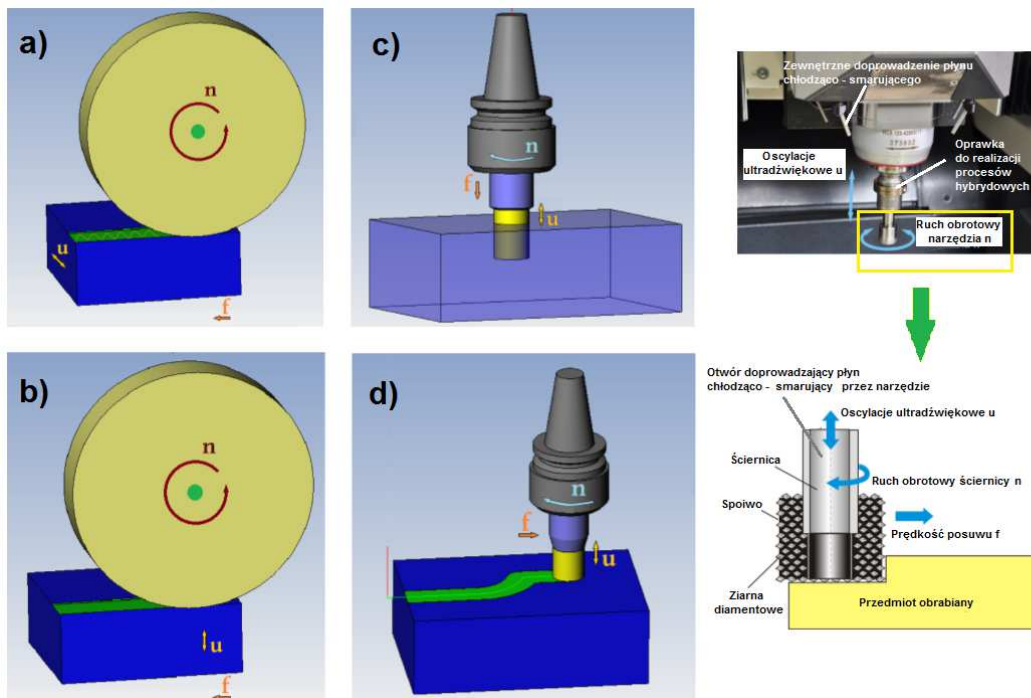
1. WPROWADZENIE

Z uwagi na potrzebę podnoszenia efektywności wytwarzania w przedsiębiorstwach przemysłu lotniczego, istnieje konieczność prowadzenia intensywnych prac badawczo-rozwojowych związanych z nowoczesnymi procesami szlifowania, w tym również hybrydowymi, do których należy proces szlifowania ze wspomaganie ultradźwiękowym. Badania naukowe i prace rozwojowe oparte na obustronnej współpracy nauki i przemysłu, mają prowadzić do budowy nowoczesnych systemów do realizacji hybrydowych procesów obróbki części o różnych właściwościach i kształtach oraz wpływać na poprawę jakości wyrobów i efektywności ekonomicznej prowadzenia procesów. Obróbka trudno obrabialnych stopów oraz kompozytów stosowanych w technice lotniczej stanowi ciągle duże wyzwanie technologiczne przed inżynierią wytwórczą dla potrzeb tej gałęzi przemysłu. Wysokie wymagania co do utrzymania tolerancji wymiarowo - kształtowej, jakości powierzchni oraz stanu technologicznej warstwy wierzchniej wytwarzanych części samolotów, determinują w istotny sposób proces produkcyjny. W zakresie trudno obrabialnych materiałów stosowanych w przemyśle lotniczym należy uwzględnić również większą, niż w przypadku standardowych materiałów konstrukcyjnych, liczbę parametrów określających efekty procesu ze względu na wysokie wymagania odbiorców. Chodzi tutaj w szczególności o parametry związane ze stanem warstwy wierzchniej tj. odkształcenia i naprężenia w tym obszarze oraz powstającą tzw. "białą warstwę", która znacząco zmniejsza wytrzymałość zmęczeniową wykonanych części. Przypuszcza się, że szlifowanie ze wspomaganie ultradźwiękowym może być technologią obróbki

pozwalającą na zwiększenie efektywności wytwarzania w niektórych obszarach tej gałęzi przemysłu.

2. CHARAKTERYSTKA PROCESU SZLIFOWANIA ZE WSPOMAGANIEM ULTRADŹWIĘKOWYM

W ostatnich latach zauważalne jest (na podstawie analiz literaturowych) duże zainteresowanie procesami hybrydowymi. Powodem tego zainteresowania jest między innymi dążenie do zwiększania jakości wyrobów, podnoszenie efektywności procesów oraz powstawanie nowych, zaawansowanych technologicznie obrabiarek. Przykładem procesów hybrydowych jest proces szlifowania ze wspomaganie ultradźwiękowym (Ultrasonic Assisted Grinding - UAG). Procesem UAG nazywamy proces obróbki ścierniej, w którym występują kontrolowane mechanizmy procesu wynikające z oddziaływania energii mechanicznej ruchu obrotowego ściernicy oraz ruchu oscylacyjnego narzędzia lub przedmiotu obrabianego; kinematyka procesu UAG odzwierciedla generalnie proces konwencjonalny (ruch główny to ruch obrotowy wrzeciona n), dodatkowo jednak, uwzględnia czynnik wspomagający w postaci ruchu oscylacyjnego ściernicy lub przedmiotu obrabianego u o niewielkiej amplitudzie z częstotliwością ultradźwiękową. Z tego względu możemy wyróżnić dwie podstawowe odmiany procesu tj. szlifowanie wspomaganie oscylacjami ściernicy i szlifowanie wspomaganie oscylacjami przedmiotu obrabianego. Dalszy podział każdej z odmian uwzględnia orientację kierunku oscylacji względem ruchów przedmiotu obrabianego lub ściernicy (rys. 1).



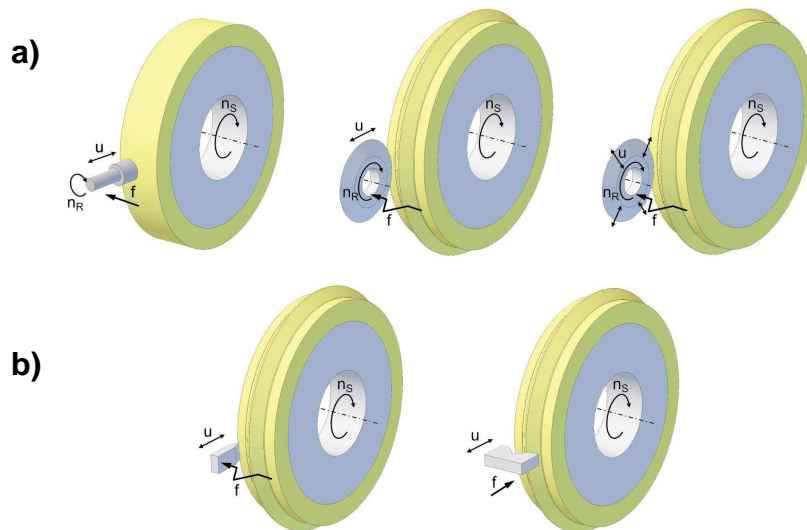
Rys. 1. Podstawowe odmiany procesu szlifowania ze wspomaganie ultradźwiękowym: a) szlifowanie ze wspomaganie osiowymi oscylacjami przedmiotu; b) szlifowanie ze wspomaganie promieniowymi oscylacjami przedmiotu; c, d) szlifowanie ze wspomaganie oscylacjami ściernicy

Proces UAG charakteryzuje się bardziej złożonym od procesu konwencjonalnego wpływem danych wejściowych na wielkości wyjściowe. Podstawowe dane wejściowe,

charakterystyczne dla tego procesu to parametry ruchu oscylacyjnego (np. amplituda oscylacji ultradźwiękowych A oraz częstotliwość oscylacji ultradźwiękowych f_{uo}).

Wymienione parametry mogą być określane podczas braku styku ściernicy z przedmiotem obrabianym oraz w trakcie procesu UAG, kiedy występuje tłumienie ruchu oscylacyjnego.

Z uwagi na właściwości ściernicy interesującą nowością jest zastosowanie wspomaganie ultradźwiękowego w procesie kondycjonowania ściernic [22], które może dotyczyć zarówno obciążaczy stojących jak i obciążaczy rolkowych (rys. 2).



Rys. 2. Przykłady kondycjonowania ściernic ze wspomaganie ultradźwiękowym
a) obciążaczami rolkowymi, b) obciążaczami stojącymi

3. BADANIA PROCESU SZLIFOWANIA ZE WSPOMAGANIEM ULTRADŹWIĘKOWYM

Procesy obróbki ubytkowej materiałów trudno obrabialnych stosowanych w przemyśle lotniczym stanowią istotny obszar prac badawczych z zakresu technologii wytwarzania. Doświadczenia przemysłowe oraz badania naukowe dowodzą, że efektywna obróbka tych materiałów wymaga stosowania odpowiednich narzędzi oraz technik obróbki. Podział procesu technologicznego na właściwie opracowane operacje obróbkowe wpływa znacząco na jego efektywność. Właściwe projektowanie procesów technologicznych obróbki tych materiałów musi opierać się na analizie jak największej ilości efektywnych metod obróbki. Konieczna jest również wiedza na temat obrabialności tych materiałów, co zostało między innymi przedstawione w pracach [4, 5].

Celem prac badawczych z zakresu szlifowania ze wspomaganie ultradźwiękowym jest analiza ruchu oscylacyjnego, analiza wskaźników jakości procesu UAG, możliwości w zakresie zastosowania różnych pod względem składu chemicznego oraz geometrii narzędzi ściernych jak również budowa układów wzbudzenia oscylacji i obrabiarek do realizacji opisywanych procesów (rys. 3).



Rys. 3. Główne kierunki badań naukowych i prac rozwojowych związanych z procesem UAG

Literatura zagraniczna wskazuje na brak szczegółowej, użytecznej przemysłowo wiedzy w zakresie obróbki ze wspomaganie ultradźwiękowym trudno obrabialnych stopów na osnowie niklu i tytanu, materiałów kompozytowych oraz materiałów twardych i kruchych. Analiza wskaźników jakości procesów ze wspomaganie ultradźwiękowym dotyczy w szczególności pomiarów składowych siły skrawania, struktury geometrycznej powierzchni obrabianych, stanu warstwy wierzchniej, dokładności wymiarowo-kształtowej oraz zużycia narzędzi. Analizowane są również możliwości w zakresie zapobiegania powstawaniu niepożądanych ubytków materiału przedmiotu obrabianego po obróbce.

Obciążanie ściernic

Właściwości ściernic z regularnego azotku boru (CBN) powodują, że w coraz większym stopniu zastępują one ściernice wykonane z konwencjonalnych materiałów ściernych, szczególnie w przypadkach szlifowania wyrobów wykonanych z trudno obrabialnych twardych i kruchych materiałów. Pełne wykorzystanie możliwości ściernic CBN, zwłaszcza w produkcji zautomatyzowanej, wiąże się z właściwym kondycjonowaniem tych ściernic, przed i w trakcie obróbki. O ile wspomaganie ultradźwiękowe znalazło już zastosowanie w wielu technikach obróbki ubytkowej (mimo potrzeby dalszych badań) to tego rodzaju wspomaganie procesu kondycjonowania ściernic jest zagadnieniem stosunkowo nowym.

W instytucie KSF (Uniwersytet Furtwangen – Niemcy) przeprowadzono badania w odniesieniu do określenia wpływu wspomaganie ultradźwiękowego procesu kondycjonowania ściernic CBN jednoziarnistym obciążaczem stojącym i obciążaczem rolkowym [22]. Amplituda drgań ultradźwiękowych wynosiła $3 \mu\text{m}$ a częstotliwość 18.75 kHz . Tak przygotowanymi ściernicami szlifowano przedmioty ze stali 100Cr6 o twardości 60 HRC. W każdym z przypadków uzyskano zmniejszenie składowych siły szlifowania oraz ciepła generowanego w strefie styku ściernica-przedmiot obrabiany w odniesieniu do prowadzenia procesu z obciążaniem konwencjonalnym przy nieznacznym wzroście chropowatości powierzchni. Po zastosowaniu wspomaganie ultradźwiękowego przy kondycjonowaniu ściernic, znacznie wzrósł (co jest godne podkreślenia) współczynnik D określający stosunek objętości ściernicy usuniętej podczas obciążania do objętości zużytego diamentu obciążacza. Te interesujące wyniki badań sugerują możliwość uzyskania znaczących wskaźników jakości procesów szlifowania przez stosowanie wspomaganie ultradźwiękowego procesów kondycjonowania ściernic CBN lecz określenie praktycznych zaleceń wymaga jeszcze wielu prac badawczych.

Szlifowanie stali

Do niedawna przyjęte było przekonanie, że wspomaganie ultradźwiękowe procesów szlifowania ma szczególne zastosowanie do obróbki twardych i kruchych materiałów. Taghi Tawakoli i jego współpracownicy wykazali w ostatnich pracach badawczych [między innymi prace 19÷21], że korzystne jest również zastosowanie oscylacji ultradźwiękowych do obróbki stali zarówno w stanie twardym jak i miękkim. W obróbce stali 100Cr6 w stanie miękkim (82 HRB) zastosowanie oscylacji ultradźwiękowych przedmiotu obrabianego dało w efekcie obniżenie składowej normalnej siły szlifowania nawet do 70%, a składowej stycznej do 50%. W tych badaniach zauważono również zmniejszenie chropowatości obrabianych powierzchni, zużycia ściernicy i temperatury warstwy wierzchniej w odniesieniu do konwencjonalnych (bez oscylacji) procesów szlifowania. Podobne tendencje w zmianach wskaźników jakości procesu szlifowania zauważono przy szlifowaniu tej samej stali ale w stanie twardym (60 HRC).

Szlifowanie stopów niklu

Stopy niklu mają bardzo szerokie zastosowanie dzięki ich właściwościom. Jednym z elementów, który występuje w turbinach i wykonany jest z żarowytrzymałych stopów niklu jest łopatką turbiny. Ważną operacją obróbkową w przypadku łopatki turbiny jest obróbka jej zamka. Najczęściej stosuje się szlifowanie głębokie (pełnego zarysu) ściernicą o określonym profilu. W ostatnich latach (począwszy od 2010 r.) ukazało się kilka publikacji, w których zostały przedstawione wyniki prac dotyczących zastosowania wspomaganie ultradźwiękowego w szlifowaniu głębokim stopów Inconel.

W pracy [2] z 2012 r. pokazano, że zastosowanie wspomaganie ultradźwiękowego spowodowało zmniejszenie składowych siły szlifowania i chropowatości powierzchni podczas szlifowania głębokiego superstopu Inconel 718 ściernicą korundową. Autorzy obserwowali również mniejsze zużycie ściernicy i poprawę współczynnika G określającego stosunek zeszlifowanego materiału przedmiotu do ubytku ściernicy. Dodatkowo pomiary mikroskopem elektronowym pokazały większą liczbę nachodzących na siebie śladów ziaren ściernych w porównaniu do konwencjonalnego szlifowania głębokiego. Pomiary 3D topografii powierzchni replik ściernicy przeprowadzone przez autorów wyżej wymienionej publikacji ujawniły, że zastosowanie wspomaganie ultradźwiękowego prowadzi do wzrostu liczby krawędzi skrawających ściernicy biorących udział w skrawaniu, co powoduje obniżenie średniej wartości parametru S_a .

Szlifowanie stopów tytanu

Tytan i jego stopy podobnie jak stopy niklu mają szerokie spektrum zastosowania w przemyśle lotniczym. W odniesieniu do stopów tytanu ich wysoki stosunek wytrzymałości do gęstości (20:1) umożliwia uzyskanie znacznych oszczędności masy w przypadku dużych części, co – w połączeniu z pozostałymi ich walorami – ma szczególne znaczenie dla lotnictwa [11]. Jednym z powszechnie stosowanych stopów tytanu jest TiAl4V. W latach 2011 i 2012 ukazały się publikacje dotyczące analizy szlifowania tego stopu ze wspomaganie ultradźwiękowym oraz analizy porównawcze z procesem konwencjonalnym. Badano procesy szlifowania na sucho i z podawaniem płynu chłodząco-smarującego.

W pracy [10] badano składowe siły szlifowania oraz jakość powierzchni w konwencjonalnym oraz wspomaganym ultradźwiękowo procesie szlifowania stopu Ti6Al4V. Autorzy stwierdzili, że oscylacje ultradźwiękowe powodują uderzenia ziaren

ściernych, mniejszą strefę styku ściernicy z przedmiotem, zmienną głębokość skrawania, efekt samoostrzenia ściernicy oraz poprawę warunków oddziaływania płynu chłodząco-smarującego, co prowadzi do zmiany składowych sił szlifowania i jakości powierzchni.

Uzyskane przez autorów publikacji [10] rezultaty pokazują, że siły szlifowania zostały zredukowane we wszystkich procesach UAG. Składowe normalne zmniejszyły się ok. 13,5%, styczne 14,2%, a dla szlifowania na sucho spadek sił był większy. Chropowatość powierzchni zmniejszyła się przeciętnie o 10%, dodatkowo w procesie UAG można zastosować większą głębokość skrawania i posuw niż w szlifowaniu konwencjonalnym, przy tej samej wynikowej chropowatości. Powyższe rezultaty wykazują możliwość uzyskania wyższej wydajności oraz obniżenia kosztów wytwarzania, a także widoczne są korzystne aspekty zastosowania procesu UAG dla środowiska.

Szlifowanie ceramiki oraz węglików spiekanych

Istnieje również grupa materiałów, określana jako twarde i kruche, których właściwości mogą być szczególnie pożądane dla wielu zastosowań w konstrukcji części lotniczych oraz narzędzi skrawających. Do tych materiałów należy zaliczyć zaawansowane materiały ceramiczne oraz węgliki spiekane. Stosowanie materiałów ceramicznych jest ważnym wyzwaniem technologicznym, w szczególności w odniesieniu do części, dla których wymagana jest wysoka odporność na ścieranie, działanie wysokich temperatur oraz odporność chemiczna. Coraz większe zapotrzebowanie na ceramikę techniczną oraz węgliki spiekane zauważalne jest również w odniesieniu do produkcji narzędzi skrawających dla potrzeb obróbki stopów lotniczych. W tym zakresie rozwijane są metody obróbki płytek oraz narzędzi monolitycznych o różnym składzie chemicznym i właściwościach. Na dużą uwagę zasługują monolityczne narzędzia ceramiczne (np. frezy), których odpowiednio ukształtowane właściwości mechaniczne oraz geometria mogą przyczynić się do wzrostu efektywności procesów obróbki superstopów żaroodpornych. Duże nadzieje w zakresie kształtowania użytkowego przedmiotów oraz narzędzi z materiałów twardych i kruchych budzi zastosowanie szlifowania ze wspomaganie ultradźwiękowym. Wiele prac badawczych wskazuje na potrzebę rozwijania oraz wdrażania metod obróbki tych materiałów. W tym zakresie można wskazać wybrane pozycje książkowe [9, 15, 18], wybrane prace doktorskie [3, 13, 24] oraz publikacje w czasopiśmie, między innymi [8, 12, 23]. Podjęto także pierwsze próby ogólnej analizy procesu UAG w odniesieniu do obróbki materiałów twardych i kruchych w ramach projektu Cornet. Wyniki tego projektu [25] wskazują na potrzebę prowadzenia dalszych szczegółowych badań w celu rozwijania tej techniki obróbki. Na podstawie prac różnych ośrodków badawczych można stwierdzić, że szlifowanie ze wspomaganie ultradźwiękowym wpływa w odniesieniu do kruchych materiałów na obniżenie siły szlifowania, ograniczenie zużycia narzędzia. Dzięki temu można zwiększyć wydajność obróbki oraz uzyskać efekt w postaci obniżenia kosztów wytwarzania.

Zastosowanie wspomaganie ultradźwiękowego podczas obróbki materiałów kruchych wpływa również na ograniczenie uszkodzeń powierzchni oraz warstwy wierzchniej wyrobów, co zostało opisane między innymi w pracach [14, 25].

Istnieje jednak potrzeba doskonalenia obróbki kształtowej tych materiałów, a także umiejętnego stosowania korzyści płynących z zastosowania oscylacji ultradźwiękowych w odniesieniu do obróbki tego samego materiału o różnych właściwościach mechanicznych (np. obróbka ceramiki w stanie białym po wstępnym spieczeniu). Brakuje również szczegółowych wytycznych doboru narzędzi i parametrów szlifowania. Należy także dokładnie przebadać złożone zjawiska fizyczne zachodzące w strefie skrawania.

Właściwe projektowanie całego procesu technologicznego może zatem prowadzić do skracania czasu obróbki nawet bardzo złożonych części przy jednoczesnej poprawie innych wskaźników jakości takich jak zużycie ściernicy czy też dokładność wymiarowo-kształtowa.

4. WNIOSKI

W wyniku zastosowania procesu UAG w przemyśle lotniczym należy oczekiwać zwiększenia możliwości w zakresie obróbki materiałów, z których wytwarza się elementy konstrukcji lotniczych oraz rozwoju technik wytwarzania narzędzi obróbkowych. Głównym obszarem zainteresowań są procesy obróbki stopów tytanu, niklu, stali stopowych, materiałów kompozytowych oraz ceramiki technicznej i węglików spiekanych.

Szlifowanie ze wspomaganiem ultradźwiękowym trudno obrabialnych materiałów stosowanych w przemyśle lotniczym stanowi nowość w zakresie technik wytwarzania wyrobów z tych materiałów. Analiza nielicznej literatury z dziedziny UAG, prezentującej wyniki tych pierwszych prac naukowo-badawczych wykazuje, że zastosowanie UAG może przynieść korzyści dotyczące wskaźników jakości procesów szlifowania w odniesieniu do procesów konwencjonalnych (składowe siły szlifowania, chropowatość powierzchni, zużycie ściernicy, ciepło w strefie szlifowania, wydajność obróbki, koszty wytwarzania). Konieczne jest jednak prowadzenie dalszych prac w celu szczegółowego uwzględnienia czynników mających istotny wpływ na wskaźniki jakości procesu UAG, jak np. parametrów ruchu oscylacyjnego tj. amplitudy i częstotliwości ruchu w odniesieniu do drgań narzędzia lub obrabianego przedmiotu, a także w procesie obciążania narzędzia. Konieczne jest również badanie obróbki materiałów o różnych właściwościach mechanicznych.

Wdrożenia specjalistycznych obrabiarek do realizacji procesu UAG w przemyśle lotniczym będą możliwe po znalezieniu efektywnych obszarów zastosowania procesu. Na rys. 4 przedstawiono podstawowe powody poszukiwania efektywnych zastosowań procesu UAG w odniesieniu do obróbki różnych materiałów stosowanych w przemyśle lotniczym.



Rys. 4. Powody poszukiwania efektywnych zastosowań procesu UAG w odniesieniu do obróbki różnych materiałów trudno obrabialnych

Szczególną uwagę należy zwrócić na możliwości w zakresie ograniczania wad materiałowych jakie powstają po obróbce. Należy wymienić tutaj między innymi wykruszenia na przedmiotach wykonanych z materiałów twardych i kruchych, uszkodzenia powierzchni oraz struktury warstwy wierzchniej, odkształcenia termiczne elementów cienkościennych oraz delaminację materiałów kompozytowych. Dodatkowo należy poszukiwać korzyści w zakresie ograniczenia zużycia narzędzi ściernych oraz zastosowania ruchu oscylacyjnego w odpowiednim kierunku względem ruchów posuwowych w celu kształtowania struktury powierzchni. Będzie to wpływać na uzyskiwanie pożądanych efektów obróbkowych.

Istotnym zagadnieniem, wymagającym oddzielnych działań badawczych jest poznanie kinematyki oraz dynamiki ruchu oscylacyjnego ściernicy, gdzie należy wskazać na ich zależność od budowy układu wzbudzania oscylacji.

Konieczne jest również poznanie możliwości w zakresie zastosowania w procesie UAG narzędzi z korundów spiekanych, regularnego azotku boru jak również konwencjonalnych materiałów ściernych.

W odniesieniu do obróbki ceramiki technicznej wymagane jest poszerzenie wiedzy związanej z zastosowaniem ściernic diamentowych.

Realizacja procesów szlifowania ze wspomaganie ultradźwiękowym wymaga posiadania maszyn technologicznych o określonej strukturze kinematycznej oraz możliwościach wzbudzania oscylacji ultradźwiękowych. W ramach przedmiotowej tematyki w Politechnice Rzeszowskiej prowadzone są obecnie badania na 5-cio osiowej obrabiarce CNC z układem wzbudzania oscylacji ultradźwiękowych narzędzia firmy Sauer- Ultrasonic 20 linear.

LITERATURA

- [1] ABDULLAH A., FARHADI A., PAK A.: *Ultrasonic-Assisted Dry Creep-Feed Up-Grinding of Superalloy Inconel738LC*. Experimental Mechanics, DOI 10.1007/s11340-011-9557-1, Published online: 12 October 2011.
- [2] BHADURI D., SOO S.L., ASPINWALL D.K., NOVOCIC D., HARDEN P., BOHR S., MARTIN D.: *A study on ultrasonic assisted creep feed grinding of nickel based superalloys*. 5-th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012.
- [3] CHURI N.: *Rotary ultrasonic machining of hard-to-machine materials*. Dissertation, Kansas State University, Manhattan, Kansas, 2010.
- [4] EZUGWU E.O., BONNEY J., YAMANE Y.: *An overview of the machinability of aeroengine alloys*. Journal of Materials Processing Technology, 134 (2003) 233-253.
- [5] EZUGWU E.O., WANG Z.M.: *Titanium alloys and their machinability – a review*. Journal of Materials Processing Technology, 68 (1997), 262-274.
- [6] ISMAIL M. F., YANAGI K., ISOBE H.: *Geometrical transcription of diamond electroplated tool in ultrasonic vibration assisted grinding of steel*. International Journal of machine Tools & Manufacture, 62 (2012) 24-31.
- [7] KUMAR J., KHAMBA J.S., MOHAPATRA S.K.: *An investigation into machining characteristics of titanium using ultrasonic machining*. Int. J. Machining and Machinability of Materials, Vol. 3, 1/2, 2008.
- [8] LAUWERS B., BLEICHER F., TEN HAAF P., VANPARYS M., BERNREITER J., JACOBS T., LOENDERS J.: *Investigation of the Process- Material Interaction in Ultrasonic Assisted Grinding of ZrO₂ based Ceramic Materials*. Proceedings of the 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting, 2010.
- [9] MARINESCU I. D., HITCHINER M., UHLMANN E., ROWE W.B., INASAKI I.: *Handbook of Machining with Grinding Wheels*. CRC Press, Taylor and Francis Group, 2007.
- [10] NIK M. G., MOVAHHEDI M. R., AKBARI J.: *Ultrasonic-Assisted Grinding of Ti6Al4V Alloy*. 5-th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012.
- [11] OCZOŚ K. E.: *Kształtowanie ubytkowe tytanu i jego stopów w przemyśle lotniczym i technice medycznej Część I*. Mechanik, 8-9/2008, 639-656.
- [12] PORZYCKI J., WDOVIK R., KRUPA K., HABRAT W.: *Zastosowanie centrum obróbkowego Ultrasonic 20 linear do badań procesów szlifowania ze wspomaganie ultradźwiękowym*.

Problemy i tendencje rozwoju obróbki ścierniej pod red. Piotra Cichosza, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012, 321-328.

- [13] QIN N.: *Modeling and experimental investigation on ultrasonic-vibration-assisted grinding*. Dissertation, Kansas State University, Manhattan, Kansas, 2011.
- [14] QU W., Wang K., Miller M.H., Huang Y., CHANDRA A.: *Using vibration-assisted grinding to reduce subsurface damage*. Precision Engineering Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, 24 (2000) 329-337.
- [15] ROWE B. W.: *Principles of Modern Grinding Technology*. William Andrew, London 2009.
- [16] SINGH R., KHAMBA J.S.: *Ultrasonic machining of titanium and its alloys: A review*. Journal of Materials Processing Technology, 173 (2006), 125-135.
- [17] SINGH R., KHAMBA J.S.: *Investigation for ultrasonic machining of titanium and its alloys*. Journal of Materials Processing Technology, 183 (2007) 363-367.
- [18] SPUR G., UHLMANN E., HOLL S.-E., DAUS N.-A., *Ultrasonic Machining of Ceramics. Handbook of Advanced Ceramics Machining* pod redakcją Ioan D. Marinescu, CRC Press Taylor & Francis Group, 2007, 327-353.
- [19] TAWAKOLI T., AZARHOUSHANG B.: *Influence of ultrasonic vibrations on dry grinding of soft steel*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 48 (2008) 1585-1591.
- [20] TAWAKOLI T., AZARHOUSHANG B., RABIEY M., *Ultrasonic assisted dry grinding of 42CrMo4*. Int. J. Adv. Manufacturing Technol., 2009, 883-891.
- [21] TAWAKOLI T., AZARHOUSHANG B., RABIEY M.: *Ultrasonic-assisted grinding of soft steel*. Industrial Diamond Quarterly, 1/09, 40-44.
- [22] TAWAKOLI T., RASIFARD A., AZARHOUSHANG B.: *Dressing of CBN grinding wheels with ultrasonic assistance*. International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems, 1 (4/2008) 321 – 331.
- [23] UHLMANN E. Submitted by Spur G.: *Surface Formation in Creep Feed Grinding of Advanced Ceramics with and without Ultrasonic Assistance*. Annals of the CIRP Vol. 47/1/1998, str. 249-252.
- [24] UHLMANN E. G.: *Tiefschleifen hochfester keramischer Werkstoffe*. Praca doktorska, Berlin 1993.
- [25] *Ultrasonic Assisted Grinding Of Brittle Hard Materials – UAG- raport projektu CORNET*.