

dr hab. inż. Włodzimierz Adamski  
Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa  
w\_adamski@poczta.onet.pl

## NOWE TECHNOLOGIE OBNIŻAJĄCE CZAS WYKONANIA CZĘŚCI INTEGRALNYCH W PRZEMYSŁE LOTNICZYM

**Streszczenie:** W pracy podano sposoby obniżki kosztów wytwarzania przy wykorzystaniu nowo powstałych technologii i strategii obróbki części w przemyśle lotniczym. Opisano strategię obróbki cienkich ścianek i wręg struktury samolotu. Zwrócono uwagę na nowe technologie jak technologia przyrostowa i segmentowa obróbka plastyczna.

**Słowa kluczowe:** CAM, HSM, Technologia Przyrostowa

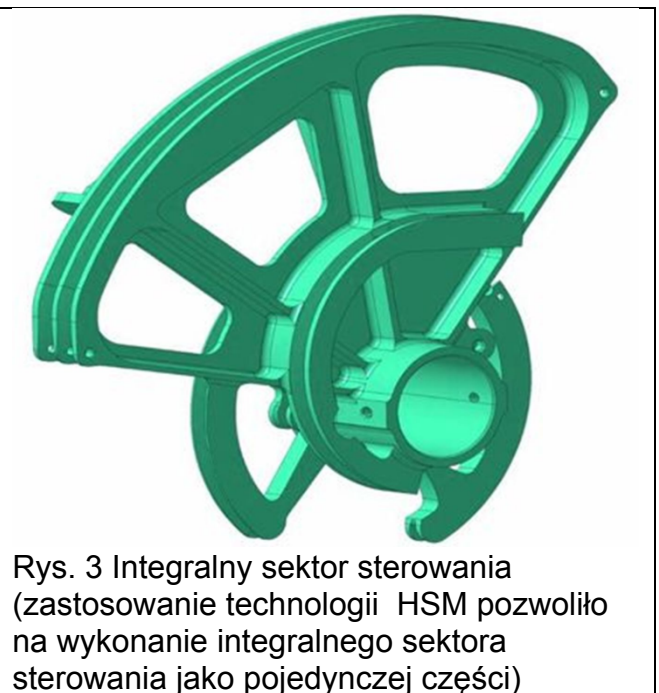
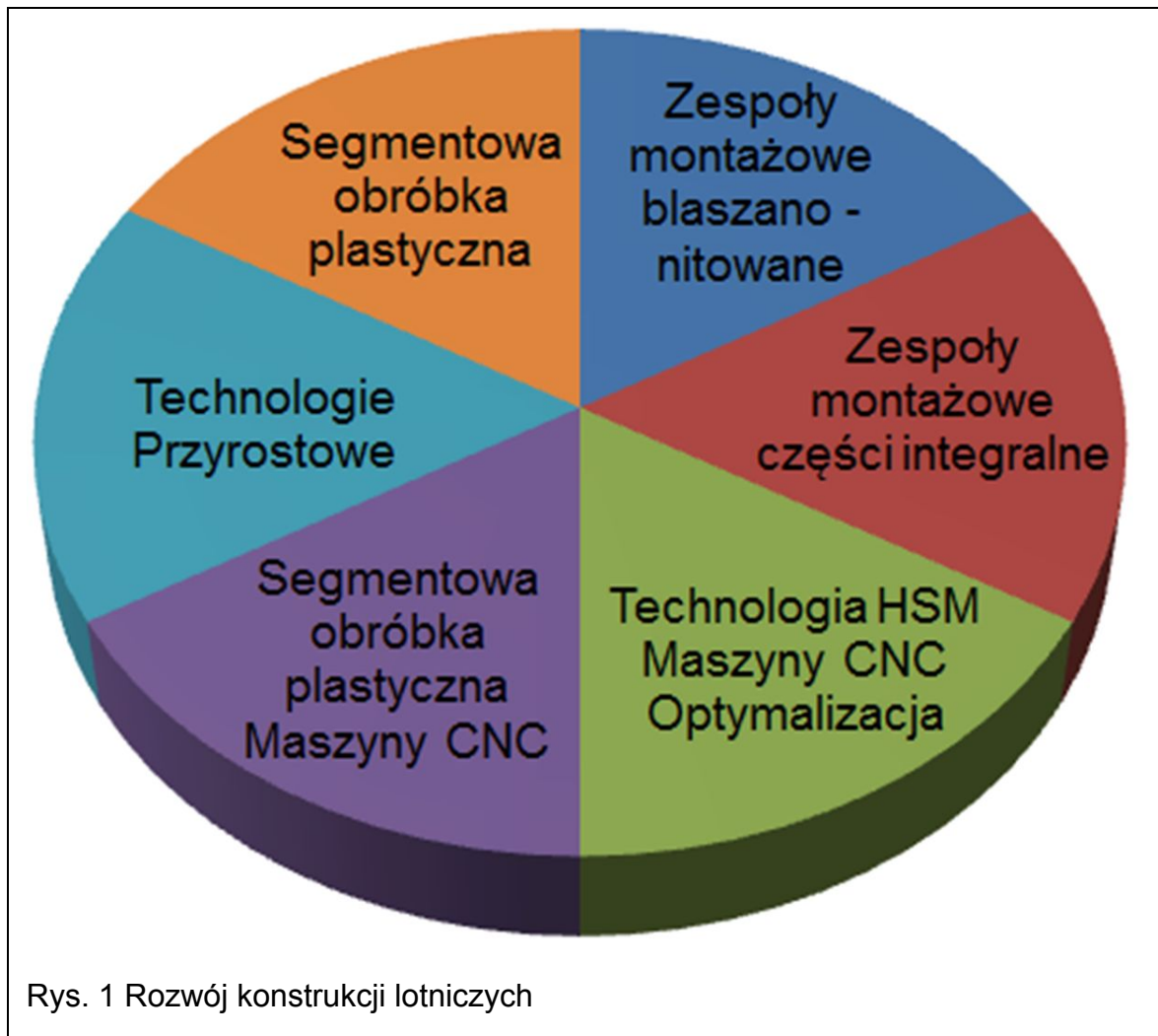
## NEW TECHNOLOGIES REDUCING TIME MACHINING OF INTEGRAL PARTS AT AVIATION INDUSTRY

**Summary:** The paper presents ways to reduce manufacturing costs by using the newly created technology and strategies for machining parts in the aerospace industry. Presents a strategy for machining of thin walls and frames of the structure of the aircraft. Attention is paid to new technologies such as Additive Manufacturing and Sectional Forging.

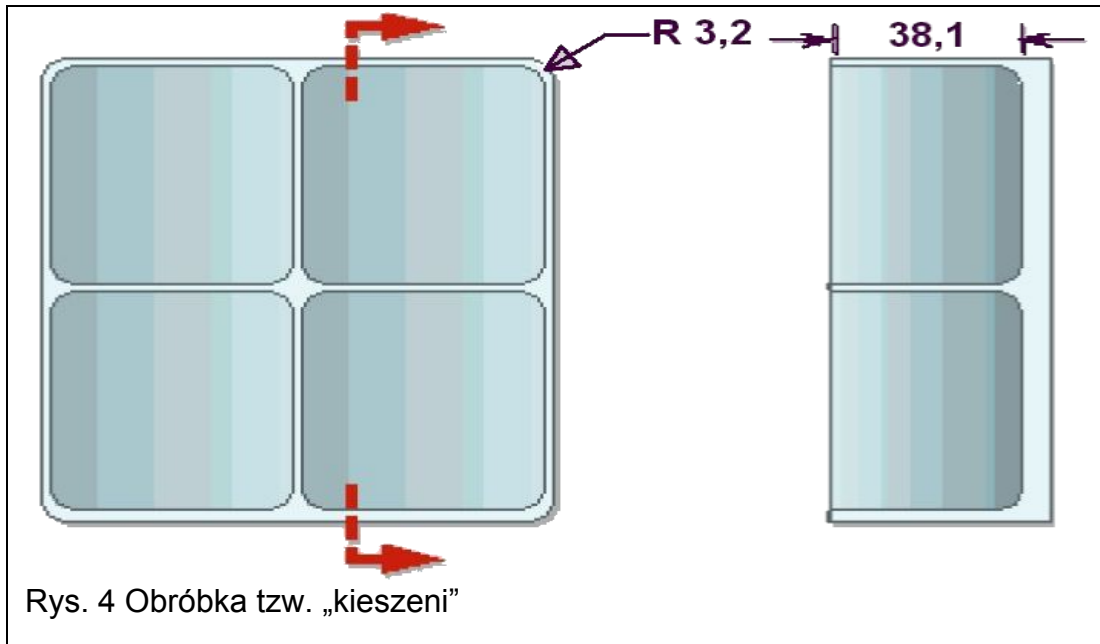
**Keywords:** CAM, HSM, Additive Manufacturing

W konstrukcji samolotów cywilnych głównie używa się materiałów ze stopów aluminium i tytanu, chociaż ostatnio w nowych konstrukcjach obserwujemy wzrost materiałów kompozytowych. **Aerobus A380** zawiera ~25% materiałów kompozytowych a najnowsze samoloty **Boeinga 787** i **Airbusa A350 XWB** zawierają już ~50% materiałów kompozytowych. Jednak nadal mamy duży udział materiałów opartych na stopach aluminium i tytanu. Części lotnicze wykonywane ze stopów aluminium i tytanu są obrabiane obróbką skrawaniem z płyt walcowanych profili i odkuwek, rzadziej z odlewów. Czasami są jeszcze dodatkowo obrabiane z wykorzystaniem procesów zginania i umacniania powierzchniowego *shot peening*.

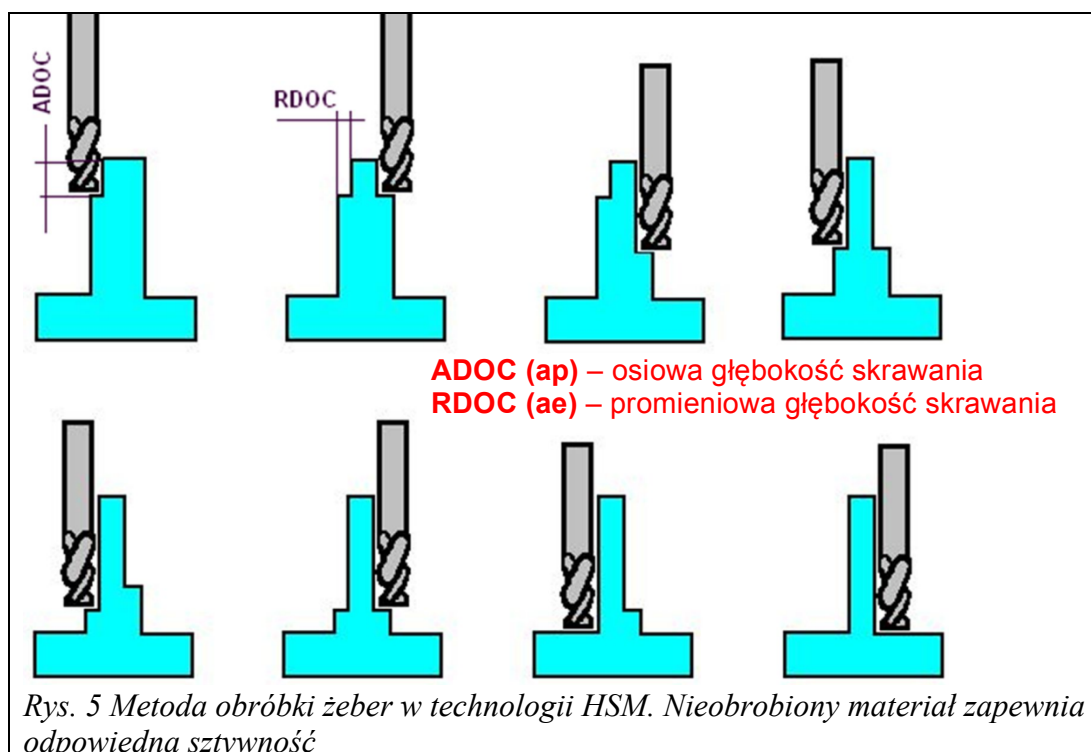
Dążenie do obniżki kosztów wytwarzania w przemyśle lotniczym przyczyniło się wydatnie do powstania nowych technologii i strategii obróbki części. Konstrukcje lotnicze XX wieku były przeważnie konstrukcjami blaszano nitowanymi z niewielkim dodatkiem materiałów kompozytowych (rys. 1). Podzespoły i zespoły montażowe charakteryzowały się wielką liczbą części składowych i co za tym idzie dużą pracochłonnością związaną z pracami montażowymi. Sytuację tą zmieniło wprowadzenie technologii **High Speed Machining HSM**, która to technologia umożliwiła wykonanie bardzo skomplikowanych integralnych lotniczych części o cienkich strukturach z pełnego materiału. Zastosowanie technologii **HSM** umożliwiło wykonanie elementów segmentu sterowania samolotu **M-28** jako jednej części zamiast zespołu składającego się z 20 części (rys. 2 i rys. 3).



Znaczna liczba części lotniczych tj. żeber, wręg charakteryzuje się tym, że posiada dużą liczbę wybrań w materiale (chodzi tutaj o zmniejszenie ich ciężaru) czyli tzw. kieszeni (rys. 4). Obróbka takich kieszeni wymaga odpowiedniej strategii ich obróbki.



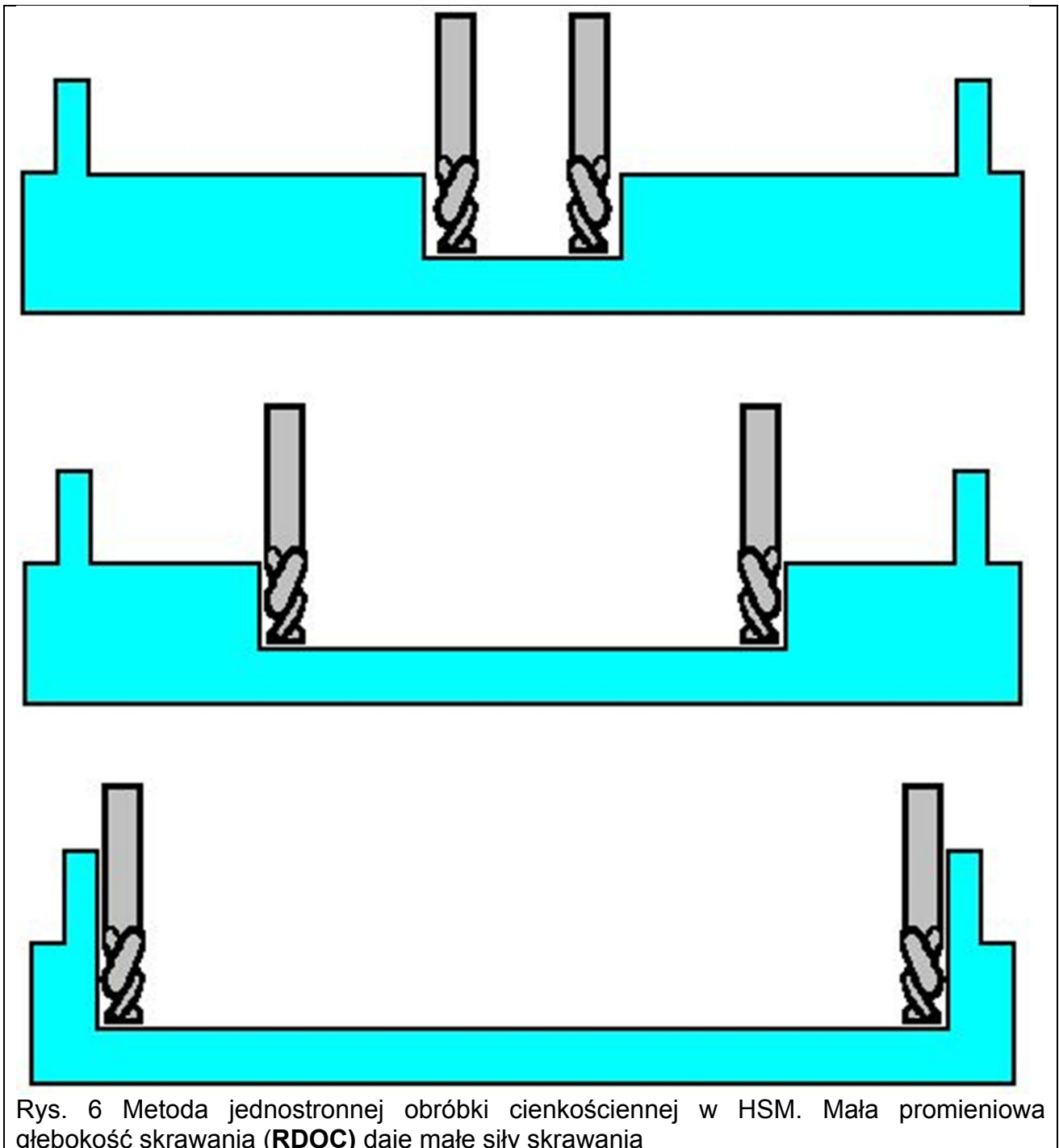
Ważnym zagadnieniem przy obróbce zgrubnej cienkich ścianek żeber jest właściwe określenie ilości materiału nieobrobionego, który zapewni nam odpowiednią wytrzymałość podczas tej obróbki skrawaniem przed obróbką wykańczającą. (rys. 5) Najlepiej jeśli stosunek wysokości ścianki do jej grubości wynosi dla stopów aluminium 4:1 tzn dla ścianek żeber o wysokości 100 mm możemy zgrubnie je skrawać przynajmniej do grubości 25 mm. Natomiast przy obróbce wykańczającej ścianek żeber o grubości 1,5 mm nie możemy stosować **Osiowej Głębokości Skrawania (OGS)** większej niż 6mm do głębokości ścianki 76 mm. [8]



Jeżeli stosujemy narzędzie skrawające np. o długości 152 mm należy ograniczyć się z osiową głębokością skrawania do do 2,5 mm i zostawić naddatek przed obróbką wykańczającą wielkości 1,3 mm i przejściem na głębokości 6,1 mm.

Przy krawędzi natarcia przy obróbce tzw kątów zamkniętych należy stosować następujące parametry skrawania, posuw zgrubny 8180 mm/min i **OGS** 2,8 mm. Dla obróbki wykańczającej frezem kulistym posuw wynosi 6980 mm/min i **OGS** 2,8 mm.

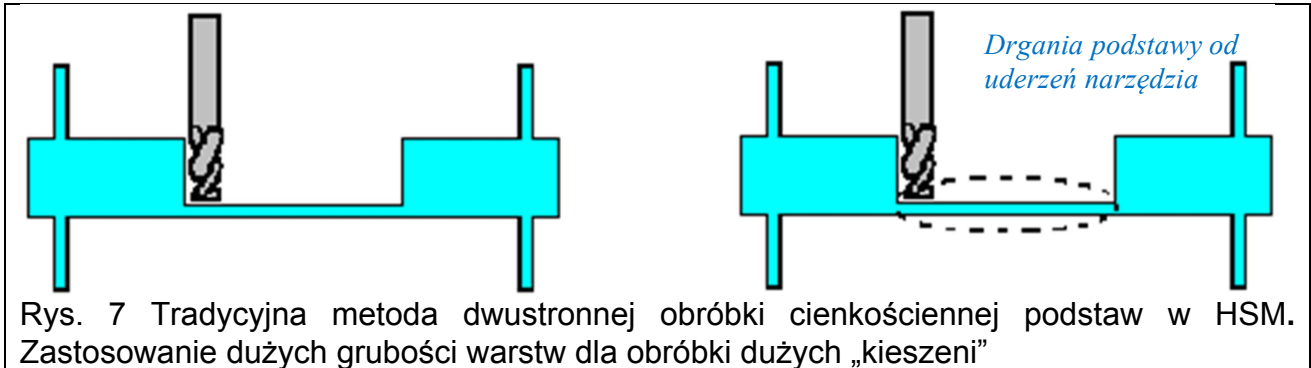
Przy wybieraniu materiału między ściankami żebra (tzw kieszenie) zaleca się stosowanie freza walcowego w wydłużonej oprawce o średnicy 12,7 mm i z promieniem 3,2 mm z posuwem zgrubnym 4320 mm/min i **Promieniową Głębokością Skrawania (PGS)** 0,5 mm i krokiem 0,5 mm. [8]



Rys. 6 Metoda jednostronnej obróbki cienkościennej w HSM. Mała promieniowa głębokość skrawania (**RDOC**) daje małe siły skrawania

W obróbce skrawaniem należy stosować taką strategię obróbki aby nieobrobiony materiał lokalnie podtrzymał materiał obrabiany (rys. 5).

Obróbka cienkich ścianek podstaw wymaga szczególnego podejścia. Zastosowanie dużych grubości warstw dla obróbki dużych „kieszeni” podczas dwustronnej obróbki cienkościennej podstawy z wykorzystaniem technologii **HSM** powoduje drgania tej podstawy (rys.7). Oczywiście możemy tego zjawiska uniknąć stosując mniejsze grubości skrawania czyli zastosować małe grubości warstw dla obróbki tych dużych „kieszeni” (rys. 8).



Należy jeszcze dodać, że siły skrawania jak i sposób mocowania mają istotny wpływ na powstałe w materiale obrabianym wartości naprężeń oraz przemieszczeń. Większe siły skrawania powodują większe odkształcenia części jak i narzędzia (rys. 9). Można tego uniknąć poprzez zastosowanie obróbki **HSM** z wieloma „przejściami” (rys.10)



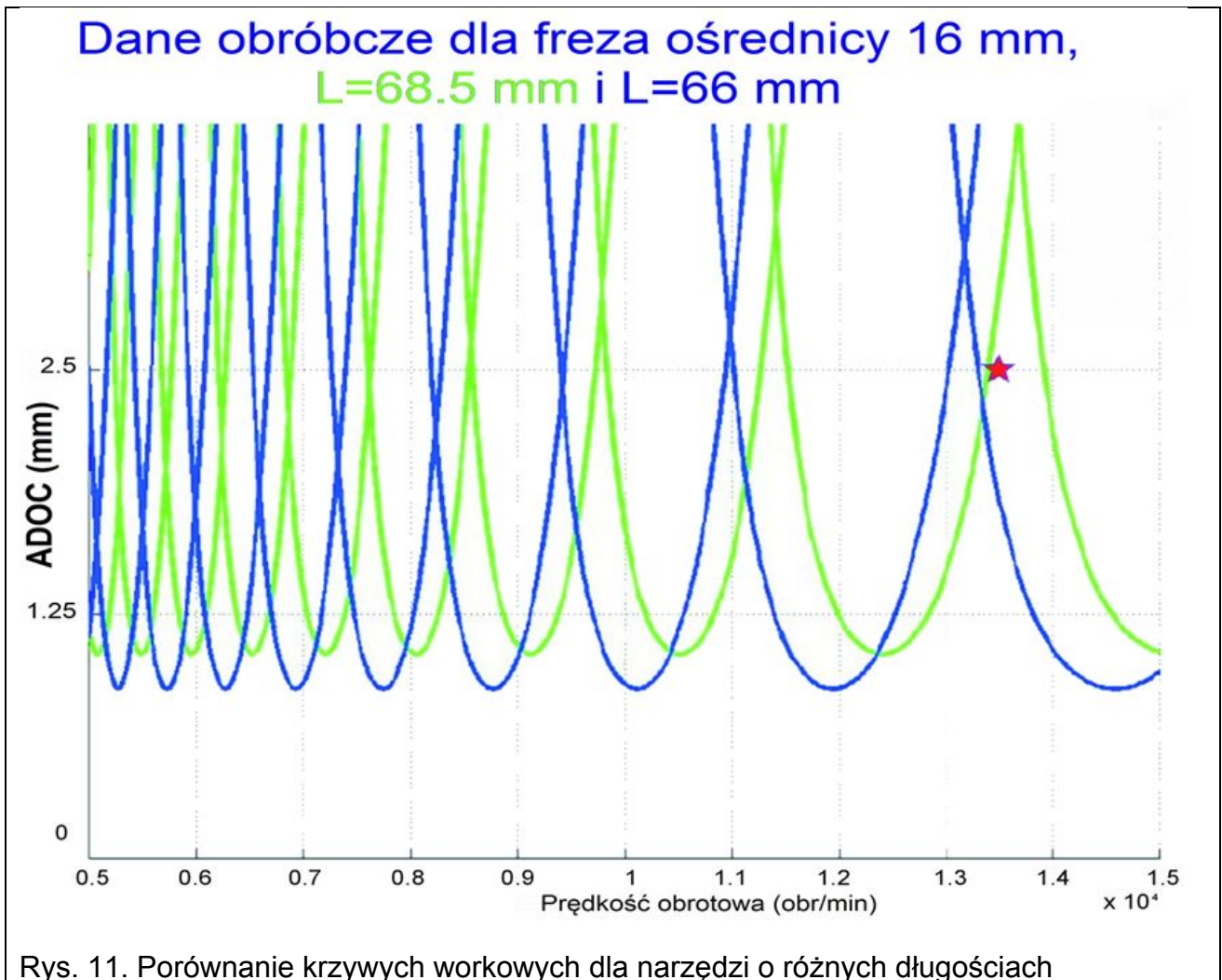
Duża prędkość skrawania pozwala usuwać materiał skrawany z małymi siłami, co nie powoduje odkształceń przedmiotu podczas skrawania. Dobierając różne parametry skrawania można wyznaczyć obróbkę stabilną. Wykorzystanie teorii drgań, umożliwiającą określenie maksymalnej ilości usuwanego materiału dla bezpiecznych i stabilnych warunków obróbki. Do tego celu służą wykresy „workowe” [1]

Podczas obróbki wykańczającej naroży w przypadku kiedy stosunek wysokość ścianki do promienia naroża jest duży należy rozważyć następującą strategię obróbki:

- Użycie większej średnicy narzędzia (mniejszy stosunek L/D) tak aby obrobić całą część.
- Wykorzystanie narzędzie o mniejszej średnicy do wykończenia naroża

Możliwy scenariusz obróbki dla kieszeni jak np. na rys 4:

1. Wykonanie w całości części narzędziem o średnicy 12,7 mm x 38 mm
2. Wykończenie naroży narzędziem o średnicy 6,4 mm x 38 mm.



Podczas wykonywania części nie jest zalecana wymiana narzędzia, ponieważ stosowanie innych narzędzi zwłaszcza dłuższych od zaprogramowanych może spowodować: złą jakość powierzchni obrabianych, złamanie lub uszkodzenie narzędzia, nadmierne drgania, które mogą uszkodzić wrzeciono. Widać to wyraźnie na rys.11 gdzie zmiana długości narzędzia o 2,5 mm powoduje że ze strefy z obróbki stabilnej (czerwona gwiazdka pod krzywą zieloną) dostajemy się w strefę niestabilną tj. chater [1] (czerwona gwiazdka nad krzywą niebieską). Różnica w długości narzędzia musi się mieścić w tolerancji 0,25 mm dla utrzymania określonej wydajności i utrzymania optymalnych parametrów obróbki. Wykres stabilności (krzywe workowe) to użyteczne narzędzie do

określenia stabilnych warunków skrawania dla różnych szybkości wrzeciona oraz MRR (szybkości usuwania materiału). Wykres można wykorzystać do znalezienia maksymalnej dopuszczalnej szybkości usuwania materiału (**Material Removal Rate MRR**), która jest kluczowym wskaźnikiem wydajności obróbki dla danej szybkości wrzeciona. Warto zauważyć, że stabilną obróbkę można osiągnąć przy dowolnej wielkości obrotów na minutę, lecz dzieje się to kosztem **MRR**. Globalny wykres stabilności, przedstawiony z przewidzeniem drgań narzędzi czy też za pomocą metody opisanej w [1], pomaga użytkownikom uzyskać wysokie wartości **MRR** przy określonych stabilnych wartościach obrotów na minutę. W wielu przypadkach, zauważywszy drgania, technolodzy próbują zmniejszać obroty wrzeciona, aby te drgania wyeliminować. Technika ta zapewni stabilne warunki skrawania, lecz może nie być najefektywniejszym rozwiązaniem. Często jest możliwe zwiększenie szybkości obrotów wrzeciona, co nie tylko wyeliminuje drgania, a jednocześnie poprawi wydajność pracy.

Przed obróbką na obrabiarkach **CNC** należy zdefiniować i określić półfabrykat czyli tzw. przygotówkę tj. czyli bryłę z której zostanie wykonany detal. Przygotówka może zostać zdefiniowana jako model 3D, umożliwia to bezpośrednią pracę na półfabrykatkach. Konstruktor podaje najczęściej na rysunku wykonawczym materiał i rodzaj (*materiał walcowany, odlew, odkuwka itp.*) półfabrykatu. Wybór sposobu wykonania i wymiarów, a więc kształtu półfabrykatu, dokonywany jest przez technologa oddziału mechanicznego. Technolog oddziału mechanicznego określa wymagania stawiane półfabrykatowi, ze względu na łatwość i ekonomiczność obróbki danego przedmiotu. Dobierając półfabrykat staramy się, aby jego kształt i wymiary były zbliżone do kształtu i wymiarów gotowego wyrobu. Wykonanie półfabrykatu z dużymi naddatkami na obróbkę wprawdzie upraszcza zwykle proces wykonania samego półfabrykatu i zmniejsza jego koszt, przedłuża jednak i utrudnia proces obróbki skrawaniem. Przygotówki w PZL Mielec są głównie wykonywane z materiałów (płyt) walcowanych. Wskutek odkształceń plastycznych następuje umocnienie materiału. Stąd podczas obróbki są problemy z utrzymaniem kształtu i wymiarów, które się zmieniają pod wpływem naprężeń wewnętrznych. Aby temu zapobiec stosuje się odpowiednie strategie obróbki na obrabiarkach **CNC**, specjalne oprzyrządowanie typu ramka, wyżarzanie odprężające (stosowanie jest jednak ograniczone czasowo i temperaturowo przez normy lotnicze), lub odprężanie wibracyjne, które zostało niedawno zastosowane w PZL do wybranych części śmigłowca.

Obecnie prowadzone badania naukowe oraz stosowanie przez takie znane firmy lotnicze jak Boeing technologii **SLS (Selective Laser Sintering - Selektywne Spiekanie Laserowe)** do produkcji części do samolotów komercyjnych i wojskowych spowodowało, że przemysł lotniczy staje się liderem w rewolucyjnym rozwoju technologii przyrostowych na świecie [11]. Technologie te zapewniają bardzo wysoki poziom elastyczności produkcyjnej nie tylko w przemyśle lotniczym, ale w całym przemyśle maszynowym (rys. 12). Obecnie tworzy się części z warstw o grubości 50  $\mu$  (niektóre firmy dostarczają urządzenia kładące warstwy o grubości 10  $\mu$ ). Technologia **SLS** jest wśród entuzjastów drukarek 3D postrzegana jako przyszłość i posiada największe pole do rozwoju. Można nią uzyskać bardzo dokładne modele o ostrych kształtach i dokładności wymiarowe do +/- 0,10 a grubość warstwy dochodzi do 50 mikronów. Wpływ na sam wymiar ma oprócz grubości warstwy nakładanej dużo więcej czynników takich jak skurcz materiału czy możliwość minimalnego posuwu głowicy, dlatego na dokładność drukowania największy wpływ ma technologia jaka wybierzemy aby wykonać nasz model w technologii druku 3D. Jeżeli jesteśmy niezadowoleni z jakości powierzchni możemy dodatkowo użyć innych technologii jak skrawanie szlifowanie czy polerowanie.



Rys. 12 Przykład części z tytanu wykonanej w technologii przyrostowej, wymiary części 1200x620x349mm, BAESYSTEMS

Kolejnym etapem będzie wykonanie przygotówek dla obrabiarek **CNC** z wykorzystaniem technologii segmentowej obróbki plastycznej [6, 7] i technologii przyrostowej **AM (Additive Manufacturing)** [11]. Firma DMG Mori Seiki uruchomiła produkcję obrabiarek typu LASERTEC 65 Shape i 210 Shape sterowanych numerycznie w 5-osiach, które pracują w trybie obróbki przyrostowej jak i ubytkowej. W tym przypadku odpady materiałowe zostaną zredukowane nawet do kilku procent. Na rys. 13 mamy pokazane kilka faz wykonania części, w pierwszej fazie jest to praca w trybie technologii przyrostowej, w drugiej fazie mamy zakończenie pracy w technologii przyrostowej i następną trzecią fazą gdzie widzimy część już po obróbce skrawaniem.



Rys.13 Kolejne fazy wykonania części,



## WNIOSKI

1. O czasie wykonania części decyduje się już na etapie konstrukcji przez wprowadzenie do struktury płatowca jak największej części integralnych.
2. Zastosowanie technologii przyrostowej i hybrydowej przyczynia się do obniżki pracochłonności części lotniczych.
3. Liczba części wykonanych w technologii przyrostowej w strukturze płatowca zaczyna się znacznie zwiększać.
4. Zastosowanie procesów kształtowania plastycznego: segmentowego i wspomaganego naprężeniami ścinającymi obniża pracochłonność części integralnych wykonywanych na maszynach CNC o ~75%.
5. Części wykonane w technologii segmentowego kształtowania plastycznego posiadają większą wytrzymałość od części wykonanych z pełnego materiału na maszynach CNC

## LITERATURA

1. W. ADAMSKI: Wybrane Problemy Projektowania I Wytwarzania CAD/CAM w Przemśle Maszynowym, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej 2012, ISBN 978-83-7199- stron 205.
2. ADAMSKI W., *Wybrane kierunki zwiększenia wydajności procesów skrawania*. Mechanik, 82, 5-6, 2009, 540-546
3. ADAMSKI W. Zasady stosowania i pracy z systemami CAD/CAM w światowym przemyśle lotniczym. Mechanik, 11, 2010,
4. J. Kuczmaszewski: Nowoczesna obróbka mechaniczna stopów magnezu i aluminium – IV Konferencja PKAERO, 06.2012, Rzeszów. <http://pkaero.prz.edu.pl/sprawozdania/KONF-25-26-06-2012/prezentacje/ZB05/czerw2012.ppt>
5. ADAMSKI W.: "Analiza przyczyn zmiany kształtu części lotniczych podczas obróbki skrawaniem na maszynach CNC i skuteczne przeciwdziałanie tym zjawiskom" Mechanik, 1, 2012, Projekt PKAERO ZB5
6. Tkocz M., Grosman F : Parametry siłowo-energetyczne procesu kształtowania segmentowego ; VIII Konferencja Fizyczne i Matematyczne Modelowanie Procesów Obróbki Plastycznej FiMM 2013, 23-25.05.2013, Jabłonna; Prace Naukowe Mechanika, z.253, red. A. Kocańda, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013, s. 77-82
7. Grosman F., Tkocz M., Pawlicki J., Libska B:
8. Wytwarzanie elementów integralnych w procesie kształtowania segmentowego; Forming 2012, 5-8.09.2012, Zakopane; Hutnik- Wiadomości Hutnicze, Nr 8, 2012, s.583-586
9. Boeing Company: High Speed Machinning, Boeing Technology, 2008
10. W. ADAMSKI: Optymalizacja czasu wykonania części integralnych. Stal nr 5-6, 2014
11. M. Włodarczyk: Analiza Wpływu Sił Skrawania Oraz Zamocowania Na Poziom Naprężeń W Aspekcie Grubości Ścianek Wybranej Konstrukcji Kieszeniowej, Postępy Nauki i Techniki Nr 8, 2011 Pol. Lub.
12. ADAMSKI W.: „Wykorzystanie technologii Additive Manufacturing w przemyśle lotniczym”. Mechanik, 2, 2013

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.



**INNOWACYJNA  
GOSPODARKA**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI FUNDUSZ  
ROZWOJU REGIONALNEGO

