

# Wpływ nowych technik wytwarzania na konstrukcję samolotu

## Impact of Modern Manufacturing Technologies at Aircraft Design

Włodzimierz Adamski \*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.588

W pracy podano jak przy wykorzystaniu nowo powstałych technologii i strategii obróbki części w przemyśle lotniczym można obniżyć koszty wytwarzania. Podano przykłady wdrożeń w przemyśle lotniczym. Zastosowanie HSM w lotnictwie wymusiło zmianę w konstrukcji dzisiejszych samolotów. Opisano strategię obróbki cienkich ścianek i wręg struktury samolotu. Zwrócono uwagę na nowe technologie jak technologia przyrostowa i odprężanie wibracyjne.

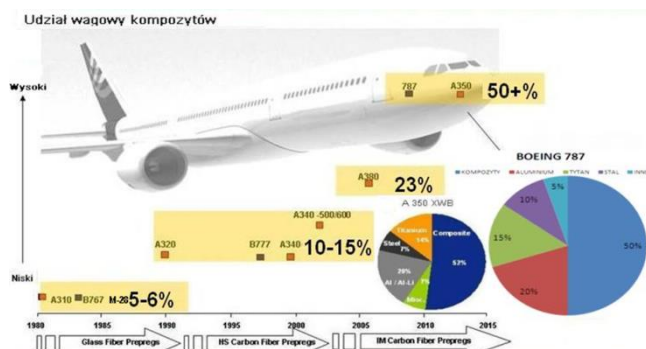
**SŁOWA KLUCZOWE:** CAM, HSM, Technologia Przyrostowa, Odprężanie Wibracyjne

*The paper describes how the use of modern technologies and parts machining strategies can reduce manufacturing costs in the aerospace industry. Sample implementations in the aerospace industry have been presented. The use of HSM in aviation forced a change in today's aircraft designs. Machining strategy for thin walls and aircraft structure framers have been described. Modern technologies of manufacturing like Additive Manufacturing and Vibratory Stress Relief have been presented.*

**KEYWORDS:** CAM, HSM, Additive Manufacturing, Vibration Stress Relieving

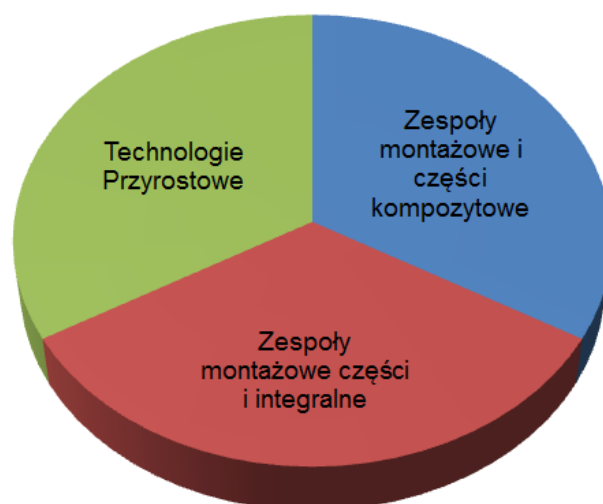
### Materiały w lotnictwie

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. Udział wagi kompozytów w budowie samolotów na przestrzeni ostatnich 35 lat pokazano na rys. 1. Wciąż jednak 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.

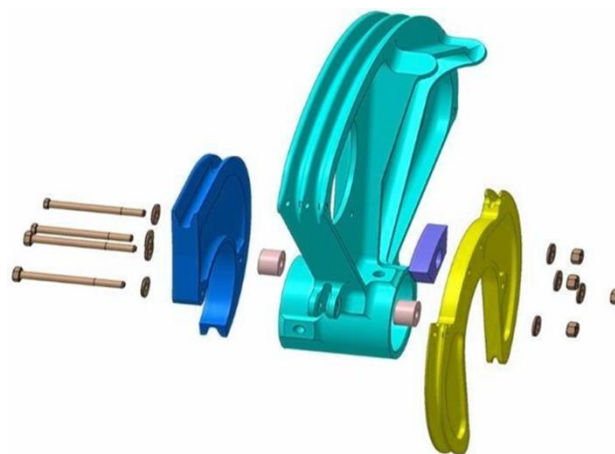


Rys. 1 Udział wagi kompozytów w budowie samolotów

Powstanie nowych technologii w przemyśle lotniczym przyczyniło się wydatnie do obniżki kosztów wytwarzania samolotu. Konstrukcje lotnicze XX wieku były przeważnie konstrukcjami blaszano nitowanymi z niewielkim dodatkiem materiałów kompozytowych (rys. 2). 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 np. wykonanie elementów segmentu sterowania samolotu **M-28** jako jednej części zamiast zespołu składającego się z 20 części (rys. 3 i rys. 4)



Rys. 2 Technologie mające główny wpływ na rozwój konstrukcji lotniczych

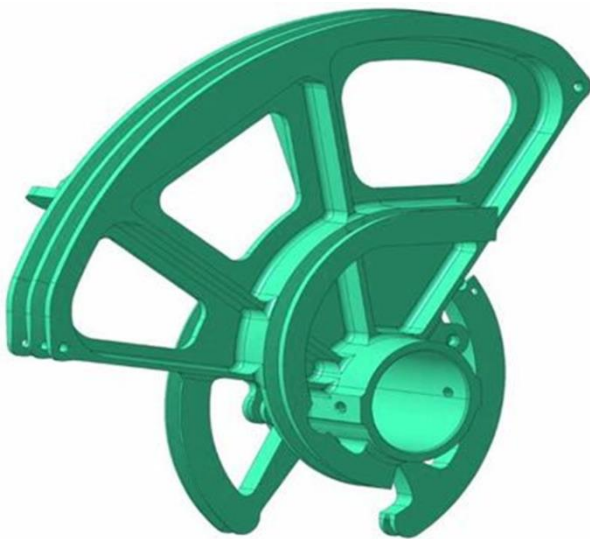


Rys. 3 Sektor sterowania składający się z ponad 20 części

\* dr hab. inż. Włodzimierz Adamski ( w\_adamski@poczta.onet.pl ) – Politechnika Rzeszowska

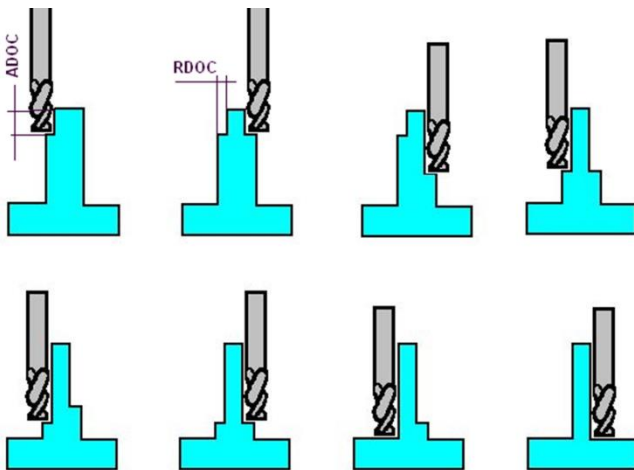
Znaczna liczba części lotniczych tj. żeber, wręg charakteryzuje się tym, że posiada dużą liczbę wybrań w materiale (chodzi tutaj o zmniejszenie ich ciężaru) czyli tzw. kieszeni.

Obróbka takich kieszeni wymaga odpowiedniej strategii ich obróbki.



Rys. 4 Integralny sektor sterowania. Zastosowanie technologii HSM pozwoliło na wykonanie integralnego sektora sterowania jako pojedynczej części

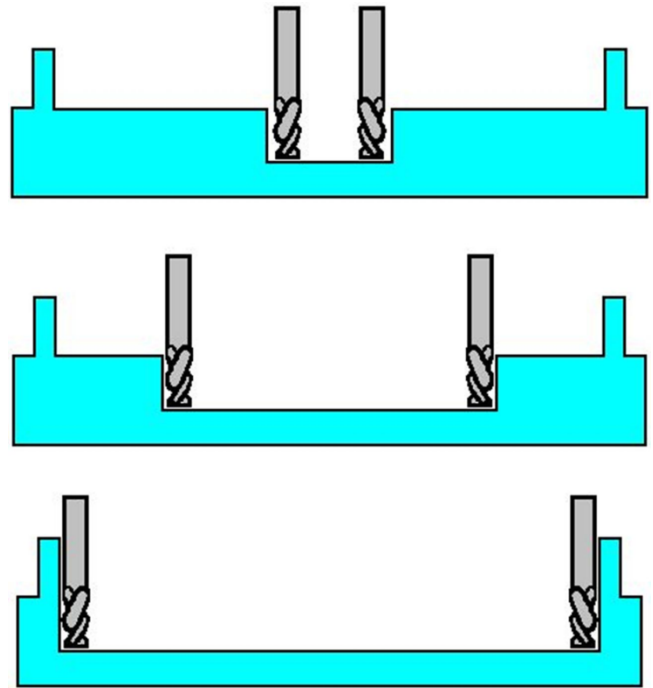
Ważnym zagadnieniem przy obróbce zgrubnej cienkich ścianek żeber jest właściwe określenie ilości materiału nieobrobionego, który zapewni nam odpowiednią wytrzymałość podczas tej obróbki skrawaniem przed obróbką wykańczającą. (rys. 5) Najlepiej jeśli stosunek wysokości ścianki do jej grubości wynosi dla 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 [7].



Rys. 5 Metoda obróbki żeber w technologii HSM. Nieobrobiony materiał zapewnia odpowiednią sztywność. **A**DOC ( $a_p$ ) – osiowa głębokość skrawania, **R**DOC ( $a_e$ ) – promieniowa głębokość skrawania

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.

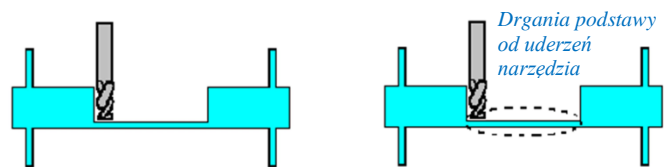
Przy krawędzi natarcia przy obróbce tzw. kątów zamkniętych należy stosować następujące parametry skrawania, posuw zgrubny 8180 mm/min i **O**GS 2,8 mm. Dla obróbki wykańczającej frezem kulistym posuw wynosi 6980 mm/min i **O**GS 2,8 mm.



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

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 **P**romieniową **G**łębokością **S**krawania (**P**GS) 0,5 mm i krokiem 0,5 mm. [7]

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



Rys. 7 Tradycyjna metoda dwustronnej obróbki cienkościennej podstaw w HSM. Zastosowanie dużych grubości warstw dla obróbki dużych kieszeni

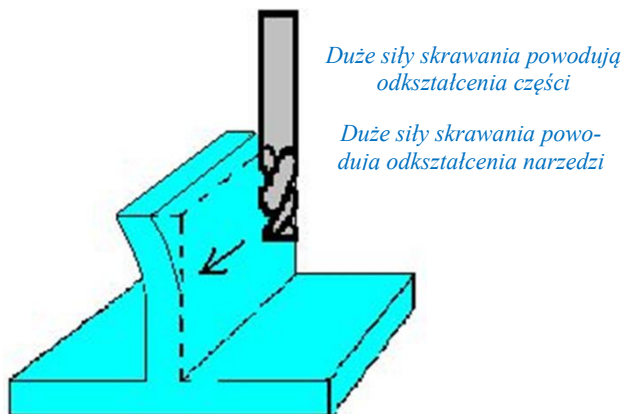
Obróbka cienkich ścianek podstaw wymaga szczególnego podejścia. Zastosowanie dużych grubości warstw dla obróbki dużych kieszeni podczas dwustronnej obróbki cienkościennej podstawy z wykorzystaniem technologii HSM powoduje drgania tej podstawy (rys.7). Oczywiście możemy tego zjawiska uniknąć stosując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



Rys. 8 Zmodyfikowana metoda dwustronnej obróbki cienkościennej podstaw w HSM. Zastosowanie małych grubości warstw dla obróbki dużych kieszeni

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).



Rys. 9 Obróbka tradycyjna. Zastosowanie dużych głębokości

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].



Rys. 10 Zastosowanie obróbki HSM z wieloma „przejściami”. Zastosowanie małych głębokości

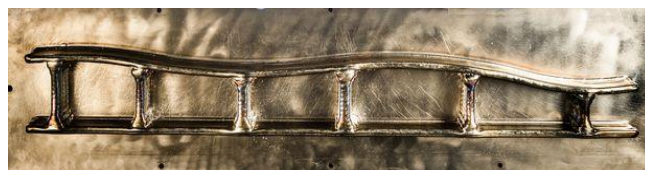
Podczas obróbki wykańczającej naroży w przypadku kiedy stosunek wysokość ścianki do promienia naroża jest duży należy rozważyć następującą strategię obróbki:

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

Wykres stabilności (krzywe workowe) [1] to użyteczne narzędzie do określania 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, zauważwszy drgania, technolodzy próbują zmniejszać obroty wrzeciona, aby te drgania wyeliminować. Technika ta za-

pewni 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.

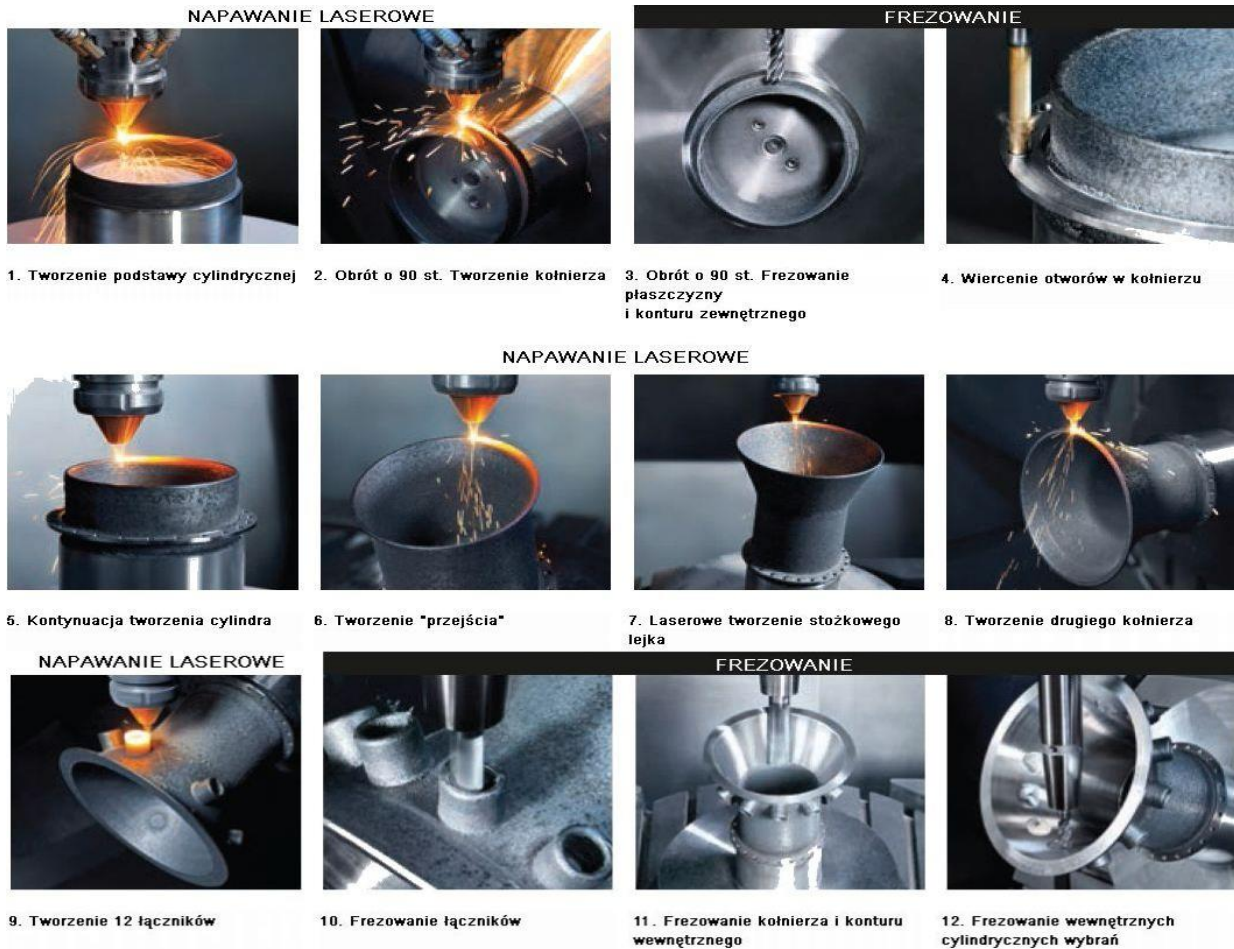
Przed obróbką na obrabiarkach **CNC** należy zdefiniować i określić półfabrykat czyli tzw. przygotówkę tj. czyli bryłę z której zostanie wykonany detal. Przygotówka może zostać zdefiniowana jako model **3D**, umożliwia to bezpośrednią pracę na półfabrykacie. Konstruktor podaje najczęściej na rysunku 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 (płyty) 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 odpężające (stosowanie jest jednak ograniczone czasowo i temperaturowo przez normy lotnicze), lub odpężanie wibracyjne, które zostało niedawno zastosowane w PZL do wybranych części śmigłowca.



Rys. 11 Przykład części z tytanu wykonanej w technologii przyrostowej, wymiary części 1200x620x349mm, BAESYSTEMS

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. 11). Obecnie tworzy się części z warstw o grubości 50  $\mu\text{m}$  (niektóre firmy dostarczają urządzenia kładące warstwy o grubości 10  $\mu\text{m}$ ). Technologia **SLS** jest wśród entuzjastów drukarek **3D** postrzegana jako przyszłość i posiada największe pole dorozwoju. Można ją uzyskać bardzo dokładne modele o ostrych kształtach i dokładności wymiarowe do  $\pm 0,10$  a grubość warstwy dochodzi do 50  $\mu\text{m}$ . 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. Kolejne fazy wykonania części w technologii przyrostowej i ubytkowej

Kolejnym etapem będzie wykonanie przygotówek dla obrabiarek **CNC** z wykorzystaniem 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. 12 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.

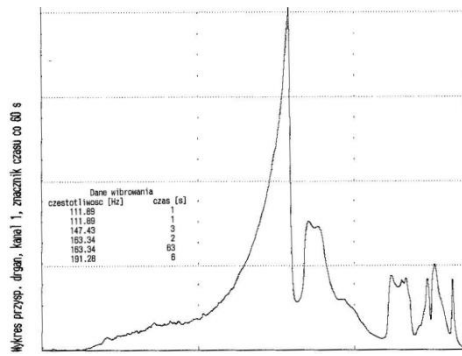
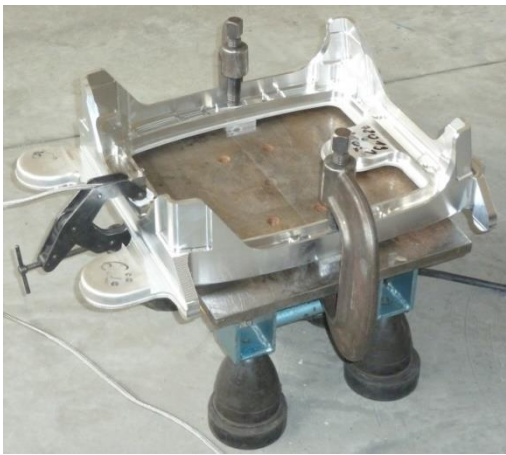
### Odprężanie Wibracyjne

Odprężanie wibracyjne polega na przyspieszonym sezonowaniu elementów maszyn i konstrukcji przez poddanie ich drganiom - głównie rezonansowym. Poprzez wymuszanie różnych postaci drgań rezonansowych w całej objętości wibrowanej części zachodzi znaczne zmniejszenie szczytowych naprężeń wewnętrznych powstałych np. po walcowaniu, odlewaniu lub obróbce termicznej. Naprężenia te są redukowane do poziomu, przy którym nie zachodzą już odkształcenia zwłoczne wywołujące takie niekorzystne zjawiska, jak utrata kształtu i wymiaru czy pękanie [6]. Odprężanie wibracyjne może być stosowane na dowolnym etapie procesu technologicznego, np. podczas obróbki zgrubnej czy też przed obróbką wykańczającą, likwidując przede wszystkim naprężenia powstałe po obróbce plastycznej półfabrykatu. Czas trwania zabiegu ograniczony jest do kilkunastu minut a nie kilku godzin, jak to jest przy wyżarza-

niu odprężającym. Szczególnie ważną zaletą tego zabiegu w przemyśle lotniczym jest także możliwość wykrycia wewnętrznych wad materiałowych, część ulega wtedy widocznemu uszkodzeniu i jest eliminowana z dalszej produkcji. Na rys. 13 pokazano typową część lotniczą struktury kadłuba samolotu podczas drgań przeprowadzanych w częstotliwościach rezonansowych widocznych na wykresie w części środkowej rysunku. Procedura odprężania polega [6] przede wszystkim na:

- Przeprowadzeniu badania harmonicznego wibrowanego elementu w celu wyznaczenia jego charakterystyk rezonansowych.
- Określeniu postaci drgań własnych i rozkładu linii węzłowych.
- Wyznaczeniu optymalnych punktów zamocowania wibratora i punktów podparcia wibrowanego elementu.
- Wibrowaniu elementu na wybranych częstotliwościach rezonansowych - 1000 do 5000 cykli w każdej postaci drgań.
- Przeprowadzeniu ponownego badania harmonicznego dla określenia istotności zmian w rozkładzie częstości własnych spowodowanych redukcją naprężeń wewnętrznych.

Na każdym etapie wibrowania prowadzi się analizę stopnia relaksacji naprężeń poprzez kontrolę zachowania się elementu w czasie wibrowania.



#### PROTOKOL ODPREZANIA WIBRACYJNEGO

numer 105/12 z dnia 18/04/12

Zleceniodawca :  
PZL MIELEC  
Adres :  
UL. WILSKA POLSKIEGO 3 MIELEC  
Miejsce wykonania :  
J.K.  
Element obrabiany :

Wibrator :  
W220  
Rodzaj mas :  
W  
Ciężar mas na stronie :

Przebieg operacji odprezania

Początek :  
18/04/12 godz. 10:18:02  
Koniec :  
10:58:22  
Dane zapisane w plikach csv :  
10:18:45  
10:22:42

częstotliwość [Hz]	czas [s]
111.89	1
111.89	1
147.43	2
183.34	3
183.34	63
191.28	6

Rys. 13. Przykład odprezania wibracyjnego części lotniczej kadłuba samolotu

Na rys. 14 pokazano nowe możliwości jakie dają narzędzia ceramiczne [11] przy obróbce bardzo twardego materiału Inconel 718 często stosowanego w przemyśle lotniczym. Osiągnięto posuw roboczy freza  $\phi 16$  mm ponad 8 m/min przy obrotach prawie 13 500 obr/min i  $a_p = 0,5$  mm,  $a_e = 16$  mm.

#### Operation 5:

- High feed milling contour

#### Machining time:

- 1min. 33 sec.



Technical Data:		
vc	675	m/min
S	13440	U/min
F	8060	mm/min
fz	0,2	mm
Z	3	
ap	0,5	mm
ae	16	mm

#### Tool:

- High feed end mill  $\phi 16$   
INCER160.190.035Z3
- Inserts: Ceramic endmill  
IN75N



Rys. 14 Zwiększone parametry skrawania przy wykorzystaniu narzędzi ceramicznych

#### Podsumowanie

- Kierunki rozwoju przemysłu lotniczego wyznaczają dzisiaj nowe technologie (kompozyty, technologia HSM i technologia przyrostowa)
- O czasie wykonania części decyduje się już na etapie projektowania samolotu
- Odpowiednia strategia obróbki umożliwi nam uniknięcie drgań podczas obróbki na obrabiarkach CNC
- Zastosowanie technologii przyrostowej i hybrydowej przyczynia się do obniżki pracochłonności.

- Zastosowanie odprezania wibracyjnego daje nowe możliwości w stosowaniu i wykonaniu części integralnych w budowie płatowca.

#### 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:

- ADAMSKI W. „Wybrane Problemy Projektowania I Wytwarzania CAD/CAM w Przemysle Maszynowym”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej 2012, ISBN 978-83-7199-stron 205.
- ADAMSKI W. „Wybrane kierunki zwiększenia wydajności procesów skrawania”. *Mechanik*, 82, Nr 5-6, (2009), 540-546.
- ADAMSKI W.: „Zasady stosowania i pracy z systemami CAD/CAM w światowym przemyśle lotniczym”. *Mechanik*, Nr 11, (2010).
- Boczmaszewski J.: „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>
- ADAMSKI W.: "Analiza przyczyn zmiany kształtu części lotniczych podczas obróbki skrawaniem na maszynach CNC i skuteczne przeciwdziałanie tym zjawiskom" *Mechanik*, Nr 1, (2012), Projekt PKAERO ZB5.
- MAJEWSKI M. : „Odprezanie wibracyjne – sposób na redukcję naprężeń resztkowych i stabilizację elementów metalowych” (2009).
- Boeing Company: "High Speed Machining", *Boeing Technology*, (2008).
- ADAMSKI W.: „Wykorzystanie technologii przyrostowej w przemyśle lotniczym”. *Stal Metale & Nowe Technologie*, Nr 3-4. (2013).
- ADAMSKI W.: „Optymalizacja Czasu Wykonania Części Integralnych Na Obrabiarkach Sterowanych Numerycznie”. *Stal Metale & Nowe Technologie*, 5-6. (2014).
- ADAMSKI W.: „Nowe technologie obniżające czas wykonania części integralnych w przemyśle lotniczym”. *Mechanik*, Nr 02, (2015).
- ADAMSKI W.: "Advanced Technologies in the XXI Century for Production of Aircraft Integral Parts", *Mindelheim Germany May* (2015)
- WŁODARCZYK M.: „Analiza wpływu sił skrawania oraz zamocowania na poziom naprężeń w aspekcie grubości ścianek wybranej konstrukcji kieszeniowej”, *Postępy Nauki i Techniki* Nr 8, (2011) Politechnika Lubelska.