

# Obróbka z wysokimi prędkościami skrawania cienkościennych konstrukcji lotniczych

## High speed machining of the thin-walled aircraft constructions

PAWEŁ BAŁON  
EDWARD REJMAN  
ROBERT SMUSZ  
BARTŁOMIEJ KIEŁBASA\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.8-9.105>

Przedstawiono strategię obróbki przedmiotów cienkościennych, która stwarza szereg problemów technologicznych związanych ze zmianą kształtów i wymiarów przedmiotu obrabianego, oraz sposoby przeciwdziałania drganiom podczas obróbki skrawaniem, aby nie następowało pogorszenie struktury geometrycznej powierzchni obrabianej – chropowatość powierzchni. Z kolei odkształcenia plastyczne mogą być przyczyną błędów kształtu oraz źródłem naprężeń własnych w warstwie wierzchniej, trudnych do usunięcia, powodujących deformację przedmiotu po obróbce. Podnosi to koszty wytwarzania, zwłaszcza przedmiotów cienkościennych, z uwagi na powstawanie braków i wydłużanie czasu produkcji. W celu poprawy jakości wykonania przedmiotów cienkościennych zastosowano kilka sposobów minimalizacji odchyłek kształtu i chropowatości powierzchni, takich jak: optymalizacja strategii obróbki, podwyższanie prędkości skrawania  $v_c$ , optymalizacja parametrów skrawania, zwłaszcza posuwu na ostrze  $f_z$  oraz promieniowej głębokości skrawania  $a_p$  i szerokości warstwy skrawanej  $a_e$  ze względu na minimalizację składowej siły skrawania prostopadłej do powierzchni frezowanej ścianki.

**SŁOWA KLUCZOWE:** obróbka z wysokimi prędkościami skrawania, frezowanie, konstrukcje cienkościenne

*Machining operations of thin-walled elements generate a lot of production process issues related to deformations and elastic and plastic displacements of the workpiece. Due to displacements of the milled workpiece, vibrations can occur, and thus, geometric errors may occur on surface in the structure of the workpiece. Furthermore, plastic deformation can also cause shape problems and be a source of internal stresses in the surface layer, which are highly difficult to remove and lead to deformation of the workpiece after machining. Consequently, this leads to an increase in the manufacturing costs of machining operations, especially of thin-walled elements, due to shortages and increased manufacturing time. It is recommended that multiple methods for minimizing machining errors be utilized to improve the quality of thin walled elements, such as: optimization of the machining strategy, increase of the cutting speed  $v_c$ , optimization of cutting parameters, especially feed per blade  $f_z$ , the radial depth of cut  $a_e$  due to the minimization of the cutting force component perpendicular to the surface of the milled wall.*

**KEYWORDS:** high speed machining, milling, thin-walled constructions

Frezowanie z dużą prędkością skrawania HSM (*high speed machining*) jest stosowane w przemyśle lotniczym, zwłaszcza podczas obróbki stopów aluminium [6]. Czynnikiem odróżniającym HSM od innych technik frezowania jest taki dobór parametrów – szerokości frezowania, głębokości skrawania, posuwu oraz prędkości skrawania – który zapewnia dobrą jakość oraz dokładność wymiaru i kształtów przedmiotu obrabianego, a równocześnie wysoką wydajność, aby skrócić proces wytwarzania elementów integralnych.

Wprowadzenie metody HSM umożliwia wykonywanie z pełnego materiału bardzo skomplikowanych integralnych części lotniczych o cienkich ściankach. Obecnie w projektowaniu struktury samolotów dąży się do tego, aby składała się ona głównie z elementów integralnych, które we wcześniej stosowanych technologiach wytwarzane były poprzez łączenie części za pomocą spawania, zgrzewania lub nitowania. Można do tej grupy zaliczyć: żebra, podłużnice, dźwigary i wręgi, a także pokrycia kadłuba i skrzydła. Po frezowaniu części te są montowane w większe zespoły.

Stosowanie dużych prędkości obróbki skrawaniem umożliwia ekonomiczne wytwarzanie elementów integralnych, poprzez skracanie czasu obróbki, ale również poprawia jakość powierzchni obrabianej, ponieważ siły skrawania są znacznie mniejsze niż w klasycznych sposobach obróbki [1, 5].

Jednym z podstawowych czynników decydujących o wprowadzeniu metody HSM w przemyśle lotniczym jest wydajność procesu skrawania  $Q$  w  $\text{mm}^3/\text{min}$ , zależna od głębokości i szerokości skrawania  $a_p$  i  $a_e$  oraz prędkości posuwu  $V_f$  [4, 8]. Stosowanie nadmiernych parametrów skrawania, zwłaszcza posuwu i głębokości, powoduje wystąpienie niekorzystnego zjawiska, jakim są drgania samowzbudne (*chatter*). Zakresy dopuszczalnej, stabilnej pracy obrabiarki prezentowane są za pomocą tzw. krzywej workowej przedstawiającej zależność głębokości skrawania od prędkości obrotowej narzędzia dla ustalonych pozostałych parametrów procesu.

W przypadku obróbki konstrukcji cienkościennych reprezentatywnym parametrem jest stosunek wysokości od grubości frezowanej ścianki; może on być [7]:

- mały  $< 15:1$ ,
- umiarkowany od  $> 15:1$  do  $< 30:1$ ,
- wysoki  $> 30:1$ .

Ten współczynnik wpływa na sztywność giętą obrabianego elementu, a co za tym idzie – na deformacje powstające podczas obróbki. Aby zmniejszyć ugięcie ścianki, stosuje się odpowiednią liczbę przejść narzędzia i skraca czas kontaktu narzędzia z przedmiotem obrabianym przez

\* Dr inż. Paweł Bałon (p.balon@szel-tech.pl), mgr inż. Bartłomiej Kielbasa (bartek.kielbasa@gmail.com) – Szel-Tech Szeliga Grzegorz; dr inż. Edward Rejman (erejman@prz.edu.pl), dr inż. Robert Smusz (robsmusz@prz.edu.pl) – Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza

zastosowanie wysokiej prędkości skrawania oraz małego stosunku głębokości skrawania  $a_p$  do szerokości warstwy skrawanej  $a_e$ . Istotną rolę odgrywa stabilność narzędzia i obrabianej ścianki. W przypadku mało sztywnego podparcia frezowanego fragmentu przedmiotu cienkościennego należy stosować frezowanie przeciwbieżne. Przy stosunku wysokości do grubości poniżej 15:1 obrabia się jedną stroną ścianki w niezachodzących na siebie przejściach. Frezowanie należy powtórzyć dla drugiej strony. Celowy jest również podział nadadku obróbkowego na część przeznaczoną do obróbki zgrubnej i wykończeniowej, z zachowaniem odpowiednich proporcji głębokości skrawania.

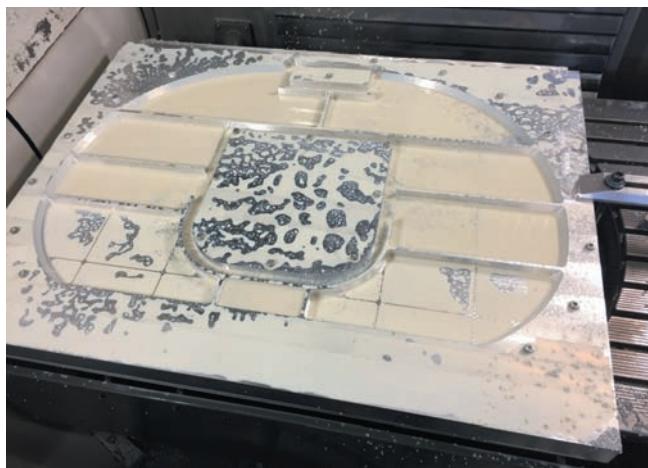
### Przedmiot badań

Przedmiotem prac była wręga samolotu wykonana ze stopu aluminium 7075 (EN 10204) o składzie chemicznym: Al 89,72%; Cu 0,09%; Mn 0,11%; Mg 1,6%; Zn 0,03%; Si+Fe 2,5%. Jako półfabrykaty wykorzystano dwie płyty o wymiarach  $60 \times 1190 \times 1215$  mm i masie 243 kg, dostarczone w stanie przesyconym. Wymiary gabarytowe obrabianego przedmiotu były następujące:  $1012 \times 1354 \times 55,8$  mm. W konstrukcji występowały ścianki o grubościach 1, 2 i 3 mm. Największe swobodne powierzchnie płaskie (bez żeber) to  $393 \times 385,4 \times 1$  mm. Stosunek wysokości żeber do ich grubości  $h/g$  zawierał się w zakresie 10÷12,9. Promienie przejść między ściankami i żebrami wynosiły 2 mm.

Wręgę frezowano na obrabiarkach firmy DMG MORI DMU 75 (obróbka zgrubna). Zrealizowano dwie wersje obróbki. Obróbka ubytkowa zgrubna odbywała się z prędkością obrotową wrzeczona  $n = 15000$  obr/min i miała na celu przygotowanie baz obróbkowych do kolejnych operacji. Przedmiot zamocowano na stole obrabiarki za pomocą łap dociskowych.

Detale wykonano w dwóch fazach: obróbki kształtującej i obróbki wykończeniowej. Prace prowadzono na dwóch detalach (i dwóch obrabiarkach) równocześnie, zastosowano obróbkę symetryczną i niesymetryczną kieszeni. Dla obróbki niesymetrycznej frezowanie kieszeni prowadzono naprzemiennie w stosunku do osi symetrii wręgi. Po zakończeniu obróbki oceniono odkształcenia wręgi.

Dwustronne wykonanie kieszeni wręgi wymagało przygotowania baz obróbkowych i baz koniecznych do ustalenia i zamocowania przedmiotu obrabianego na obrabiarce (rys. 1). W tym celu zaproponowano i wykonano z półfabrykatu kołnierz z otworami walcowymi, stanowiący bazę



Rys. 1. Mocowanie wręgi z wykorzystaniem baz technologicznych i dodatkowych otworów wykonanych przy frezowaniu kieszeni

obróbkową, a otwory pozwalały na mocowanie przedmiotu na stole obrabiarki. Bazy te zostały usunięte w ostatniej operacji obróbki wręgi, po wykonaniu jej na gotowo.

Zgodnie z założeniami dokumentacji konstrukcyjnej tolerancja wymiarów liniowych wręgi określana jest przez normę BN-85/3813-79 – Odchyłki wymiarów nietolerowanych, kształtu i położenia dla wyrobów lotniczych. Dla ścianek wręgi tolerancje te wynoszą  $g = 1 \pm 3$  mm, odchyłki: od 0 do  $-0,25$  mm. Dla wysokości żeber:  $h = 20 \pm 25,8$  mm, odchyłki: od 0 do  $-0,52$  mm. Dla wymiarów gabarytowych według dokumentacji konstrukcyjnej  $1012 \times 1354$  mm odchyłki wynoszą: od 0 do  $-2,6$  mm.

Obróbka skrawaniem wręgi obejmowała dwa etapy: obróbkę wstępną i wykończeniową. Liczba przejść we wszystkich przypadkach była uwarunkowana wymiarami ścianki i osiową głębokością skrawania. Podstawowym wymogiem było zapewnienie takiego przebiegu procesu obróbkowego, aby zwłaszcza w odniesieniu do żeber zapewnić jak najmniejsze ugięcie, a przy obróbce wykończeniowej uzyskać dodatkowo odpowiednią chropowatość powierzchni. W obrabianej wrzędze pozostawiono nadadki na obróbkę wykończeniową na poziomie 2 mm dla dużych powierzchni czołowych oraz ok. 0,2 mm na ściankach żeber o grubości  $1 \pm 3$  mm. Aby zmniejszyć ugięcie ścianki w trakcie obróbki, należało zmniejszyć siły występujące podczas skrawania. Efekt ten uzyskano poprzez pracę z dużą prędkością skrawania oraz dużym posuwem na ostrze narzędzia.

Kolejnym zabiegiem zapewniającym wysoką dokładność obróbki smukłych ścianek wręgi (stosunek wysokości do grubości wynosił ok. 13) było zachowanie odpowiedniej strategii. Najlepsze efekty uzyskano poprzez przemienną obróbkę kieszeni, ze zmianą stron obróbki i obróbką do jednakowych poziomów w każdej kieszeni [14]. W przypadku cienkich ścianek stosowano frezowanie przeciwbieżne. Największą wydajność frezowania uzyskano z zastosowaniem frezu  $\varnothing 16$  mm, a najniższą chropowatość i falistość powierzchni uzyskano frezem o  $\varnothing 8$  mm, z prędkością obrotową 20 000 obr/min.

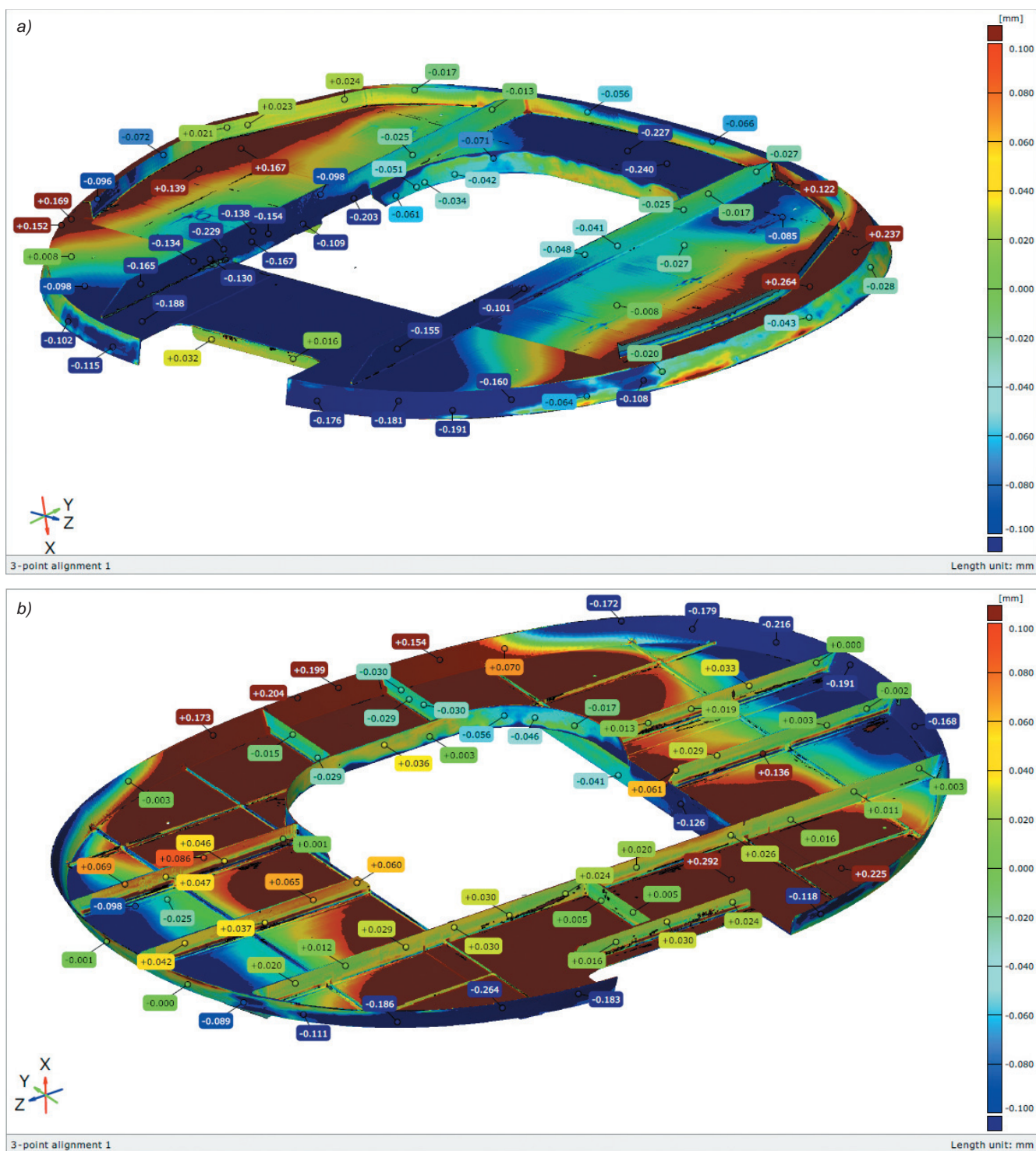
W wyniku obróbki otrzymano wręgę zgodną z dokumentacją konstrukcyjną (rys. 2).



Rys. 2. Gotowa wręga samolotu wytworzona w procesie frezowania

Masa gotowej wręgi wynosiła 3,15 kg, a masa materiału wyjściowego – 243 kg, czyli masa wyrobu stanowiła 1,3% materiału wsadowego. Na wióry zostało zmienione 98,7% półfabrykatu. Stąd współczynnik stosowany w przemyśle lotniczym *buy-to-fly* (stosunek masy materiału wyjściowego do masy gotowej części) wyniósł 77,1. Na tej podstawie można stwierdzić, że zastosowanie frezowania HSM





Rys. 3. Mapy przemieszczeń elementów wręgi po frezowaniu metodą HSM: a) widok z góry, b) widok z dołu

do wykonywania konstrukcji cienkościennych – chociaż masa wiórów może stanowić nawet 95% materiału wsadowego – jest jak najbardziej uzasadnione. Należy podkreślić, że masa oryginalnej wręgi stosowanej dotychczas w samolocie wynosi 3,85 kg.

W celu sprawdzenia przede wszystkim kształtu, wymiarów i przemieszczeń przestrzennych wręgi dokonano jej pomiaru optycznego za pomocą skanera typu GOM (rys. 3). Badania te umożliwiają określenie wymiarów liniowych poszczególnych elementów wręgi oraz stworzenie map cyfrowych i warstwicznych obrazujących stereometrię wręgi. Mapy pozwalają wyznaczyć przemieszczenia, jakim ulega duża powierzchnia wręgi, będące następstwem naprężeń własnych powstających w konstrukcji

podczas obróbki mechanicznej [2, 3]. Analiza wyników pomiarów wskazuje, że występujące odchyłki wymiarów liniowych mieszczą się w przewidzianych tolerancjach. Płyta ulega deformacji przede wszystkim względem krótszej osi symetrii. Współrzędne przemieszczenia są symetryczne względem dłuższej osi. Największe przemieszczenia osiągają wartość 0,57 mm. Uzyskane wyniki należy jednak traktować jako preferencje występujących przemieszczeń i oceniać je w kontekście stosowanej metody pomiarowej. Skaner typu GOM zapewnia dokładność pomiarów na poziomie  $\pm 0,25$  mm, a co za tym idzie, takim błędem mogą być obarczone wyniki. Metoda ta jednak w sposób jakościowy pokazuje, jakich deformacji należy się spodziewać podczas obróbki wyrobów o podobnej strukturze.

TABLICA. Wymiary grubości wybranych ścianek wręgi

Nr punktu	Wymiar u podstawy	Wymiar na wierzchołku	Nr punktu	Wymiar u podstawy	Wymiar na wierzchołku	Nr punktu	Wymiar u podstawy	Wymiar na wierzchołku
1	2,00	2,02	11	3,01	3,01	21	2,01	2,02
2	2,01	2,02	12	2,05	2,01	22	2,05	2,02
3	2,01	1,95	13	2,01	2,01	23	1,99	2,00
4	1,95	2,02	14	2,01	2,01	24	1,05	
5	2,00	2,02	15	2,00	2,02	25	1,07	
6	2,05	2,00	16	2,00	2,00	26	1,06	
7	1,96	1,95	17	2,00	2,00	27	2,00	2,02
8	1,95	1,96	18	1,98		28	2,00	2,01
9	2,00	2,05	19	2,00		29	2,01	2,02
10	3,01	3,01	20	1,95		30	2,01	2,01

Aby dokładnie ocenić grubość ścianek żeber, które są najbardziej istotne z punktu widzenia wytrzymałości konstrukcji, zmierzono je mikrometrem. Pomiary prowadzono w tych punktach, gdzie spodziewano się powstania największych przemieszczeń podczas obróbki mechanicznej: u podstawy żeber oraz na ich wierzchołkach. Wyniki pomiarów podano w tablicy.

Aby ocenić kształt, wymiary i przemieszczenia przestrzenne wręgi jako podzespołu gotowego do montażu, sprawdzono ją na przyrządzie wykorzystywanym do kontroli wręg w samolotach. Badania wykazały, że wymiary wręgi mieszczą się w granicach tolerancji przewidzianych w dokumentacji technicznej i zgodnych z normą BN-85/3813-79.

#### Uwagi końcowe i wnioski

Zastosowanie frezowania z dużymi prędkościami skrawania zapewnia wykonanie cienkościennych wręg konstrukcji lotniczych o odpowiedniej dokładności i z uwzględnieniem możliwości obróbkowych stopów aluminium 7075. Właściwy dobór parametrów skrawania zapewnia chropowatość i falistość powierzchni obrabianej wymagane dla tej klasy wyrobów. W przypadku obróbki ścianek o stosunku wysokości do grubości <15 wpływ odkształcenia konstrukcji na dokładność wymiarową obrabianego elementu jest mało istotny. Przy większej smukłości ścianek wpływ ten zaczyna być widoczny i należy go zminimalizować przez dobór parametrów skrawania (posuwu, głębokości skrawania) [9, 10].

Zapewnienie dokładności wymiarowo-kształtowej w trakcie obróbki wymaga poprawnego wyboru baz obróbkowych i sposobu mocowania przedmiotu. W złożonych przestrzennie konstrukcjach należy przewidzieć dodatkowe bazy gwarantujące sztywność mocowania i usuwane w operacjach końcowych.

Zastosowanie metody HSM zarówno do obróbki zgrubnej, jak i wykończeniowej pozwala na skrócenie czasu wytworzenia przedmiotu. Czas wykonania prototypu wręgi, łącznie z przygotowaniem oprogramowania, wyniósł ok. 320 h. W przypadku produkcji seryjnej dzięki doświadczeniu zdobytemu podczas wytwarzania prototypu oraz sprawdzonemu programowi sterującemu czas wykonania wręgi może ulec skróceniu do 15 h.

Frezowanie z wysokimi prędkościami skrawania HSM jest obecnie jedną z kluczowych metod frezowania stosowanych w przemyśle lotniczym. Czynnikiem odróżniającym ją od innych technik frezowania jest dobór parametrów skrawania, głębokości warstwy skrawanej, posuwu oraz prędkości skrawania [11, 13].

**Prace i badania zostały przeprowadzone w ramach projektu „699757/SAT-AM”, temat: JTI-CS2-2015-CPW02-AIR-02-07. More Affordable Small Aircraft Manufacturing; Airframe itd. Grant Agreement No: CS2-AIR-GAM-2014-2015-01 (annex III), współfinansowanego przez Horyzonty 2020 Clean Sky 2. Specjalne podziękowania kierowane są do następujących podmiotów: Instytutu Lotnictwa, firmy Szel-Tech Szeliga Grzegorz, Zakładów Lotniczych Margański & Mysłowski, PZL Mielec, CIRA, firm Eurotech, Metrol i Ultra-tech.**

#### LITERATURA

- Lundblad M. "Influence of Cutting Tool Geometry on Residual Stress in the Workpiece". *Proc. Third Wave AdvantEdge User's Conferece*. GA. Paper 7. Atlanta 2002.
- Shet C., Deng X. "Residual Stresses and Strains in Orthogonal Metal Cutting". *Int. J. Machine Tools Manuf.* 43, 6 (2003): s. 573–587.
- Shih A.J., Yang H.T.Y. "Experimental and Finite Element Predictions of Residual Stresses Due to Orthogonal Metal Cutting". *Int. J. Num. Meth. Eng.* 36 (1993): s. 1487–1507.
- Adamski W. "Manufacturing development strategies in aviation industry". *Advances in Manufacturing Science and Technology*. 34, 3 (2010): s. 73–84.
- Mativenga P.T., Hon K.K.B. "An experimental study of cutting force in high speed end milling and implications for dynamic force modelling". *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 127, 2 (2005): s. 251–261.
- Kuczmaszewski J., Pieško P., Zawada-Michałowska M. "Influence of milling strategies of thin-walled elements on effectiveness of their manufacturing". *Procedia Engineering*. 182 (2017): s. 381–186.
- Zębała W. „Minimalizacja błędów przedmiotów cienkościennych”. *Inżynieria Maszyn*. 15, 3 (2010): s. 45–54.
- Oczoł K. „Obróbka wysoko wydajna HPC (High Performance Cutting)”. *Mechanik*. 11 (2004).
- Oczoł K. „Postęp w obróbce skrawaniem. Część III. Obróbka z dużymi prędkościami”. *Mechanik*. 3 (1998).
- Olearczyk K. „Obróbka z dużymi prędkościami skrawania (HSM)”. *Mechanik*. 3 (2001).
- Adamski W. „Wybrane problemy projektowania i wytwarzania CAD/CAM w przemyśle maszynowym”. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2012, ISBN 978-83-7199.
- Adamski W. „Analiza przyczyn zmiany kształtu części lotniczych podczas obróbki skrawaniem na maszynach CNC i skuteczne przeciwdziałanie tym zjawiskom”. *Mechanik*. 1 (2012).
- Włodarczyk M. „Analiza wpływu sił skrawania oraz zamocowania na poziom naprężeń w aspekcie grubości ścianek wybranej konstrukcji kieszeniowej”. *Postępy Nauki i Techniki*. 8 (2011). Politechnika Lubelska.
- Grzesik W. „Wykorzystanie modelowania numerycznego i technik VR do doskonalenia procesów technologicznych części silnie obciążanych cieplnie i mechanicznie”. *Mechanik*. 10 (2012): s. 803–817. ■