

# WŁAŚCIWOŚCI PRZETŁOCZEŃ USZTYWIAJĄCYCH KSZTAŁTOWANYCH W CIENKICH BLACHACH Z LOTNICZEGO STOPU ALUMINIUM 2024-T3 METODĄ FORMOWANIA PRZYROSTOWEGO

## *The properties of the stiffening ribs shaped in thin sheetes with aviation alloy 2024-T3 by icremental forming method*

Andrzej KUBIT, Dawid WYDRZYŃSKI, Magdalena BUCIOR, Rafał KLUZ, Bogdan KRASOWSKI

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, dotyczących podłużnych przetłoczeń w cienkich blachach, pełniących rolę ryfli usztywniających. Zagadnienie dotyczy przetłoczeń kształtowanych w blachach z lotniczego stopu aluminium 2024-T3 obustronnie platerowanych, o grubości 0,4 mm. Przetłoczenia wykonano relatywnie nową technologią tzw. kształtowania przyrostowego, która polega na punktowym odkształcaniu materiału poprzez narzędzie w formie trzpienia stopniowo zagłębiane w materiale, zgodnie z określoną ścieżką determinującą kształt finalnego przetłoczenia. Formowanie prowadzono przy użyciu trzy-osiowej frezarki numerycznej stosując narzędzie o średnicy 6 mm z promieniem na czole o wartości R3. Kształtowano przetłoczenia o długości 120 mm oraz szerokości 20 mm. W ramach badań rozpatrywano różne głębokości przetłoczeń stopniując je co 1 mm w zakresie od 1 do 5 mm. Największą wartość głębokości o podanej wartości przyjęto, ponieważ przy większej głębokości od 5,5 mm kształtowana blacha ulegała pękaniu, dlatego wartość 5 mm uznano za maksymalną, dla której prowadzono analizy.

Dla opisanych przetłoczeń przeprowadzono statyczne próby wyboczenia, a na ich podstawie stwierdzono, że głębokość przetłoczenia równa 4 mm, jest wartością krytyczną, gdyż siła wyboczenia dla przetłoczeń w zakresie od 1 do 4 mm wzrasta wprost proporcjonalnie do głębokości przetłoczenia, natomiast przy głębokości równej 5 mm siła ta ulega spadkowi.

**Słowa kluczowe:** formowanie przyrostowe, przetłoczenia usztywniające, badania na wyboczenie

**Abstract:** The paper presents the results of experimental research on longitudinal ribbing in thin sheets, made as stiffening ribs. The issue concerns ribbing formed in 2024-T3 aluminum alloy plates, 0.4 mm thick. The embossing was made using a relatively new technology, the so-called incremental sheet forming, which is a point of deformation of the material through the tool in the form of a plunger, gradually penetrated into the material in accordance with a defined path that determines the shape of the final embossing. Forming was carried out using a three-axis numerical milling machine using a 6 mm diameter tool with a head radius of R3. Embossments 120 mm long and 20 mm wide were formed. As part of the research, different depths of embossing were considered, grading them every 1 mm in the range from 1 to 5 mm. The highest value of the depth with the given value was assumed, because above the 5.5 mm depth the shaped sheet was cracking, so the value of 5 mm was considered the maximum for which the analyzes were carried out.

For the described embossments static buckling tests were made, on the basis of which it was found that the embossing depth of 4 mm is a critical value, because the buckling force for extrusions in the range from 1 to 4 mm increases in direct proportion to the depth of the ribbing, while at a depth of 5 mm force this falls.

**Keywords:** incremental sheet forming, stiffened ribs, buckling tests

## Wprowadzenie

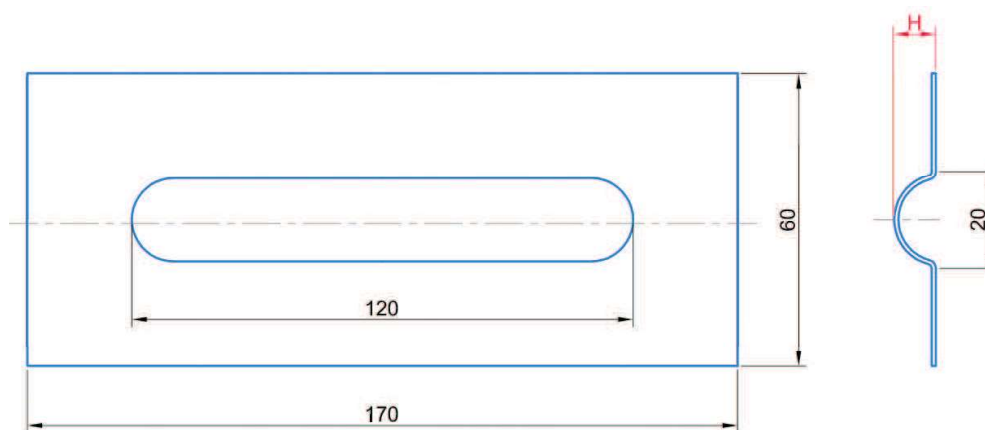
Jednopunktowe formowanie przyrostowe (ang. single point incremental forming) to uniwersalna, elastyczna metoda kształtowania plastycznego blach z użyciem uniwersalnych obrabiarek numerycznych lub robotów [6]. Rozwój tej technologii wiąże się z koniecznością szybkiego reagowania przedsiębiorstw produkcyjnych na potrzeby rynku. Nowe produkty muszą być wprowadzane na rynek w krótkim czasie, co wiąże się z wymogiem maksymalnego skrócenia etapu projektowo-wdrożeniowego. Stąd formowanie przyrostowe staje się obecnie metodą szybkiego prototypowania w obszarze przeróbki plastycznej blach bez wymogu stosowania drogiego, czasochłonnego w wykonaniu oprzyrządowania [6]. Dodatkową zaletą omawianej metody jest możliwość uzyskania większych odkształceń plastycznych niż w przypadku

tradycyjnej przeróbki plastycznej wykorzystującej klasyczny tłocznik [6].

Aktualnie można spotkać wiele prac naukowych, potwierdzających możliwości stosowania kształtowania przyrostowego w odniesieniu do różnych materiałów takich jak: stopy aluminium [3, 11, 13, 14], stopy tytanu [6], ale także sztuczne tworzywa polimerowe [1, 8, 9]. Z kolei autorzy pracy [5] wskazują na możliwości formowania kompozytowych struktur warstwowych typu „plaster miodu”.

Jednakże przede wszystkim, ze względu na uniwersalność, metoda formowania przyrostowego znajduje dziś zastosowanie jako technologia wytwarzania części w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym, a także medycznym [2, 4, 7, 12].

Technikę formowania przyrostowego przyjęto w pracy jako metodę szybkiego prototypowania



Rys. 1. Kształt oraz wymiary próbki z przetłoczeniem usztywniającym do badań na wyoboczenie  
 Fig. 1. The shape and dimensions of specimen with stiffened rib that was used in experiment

Tabela 1. Skład chemiczny stopu aluminium 2024-T3  
 Table 1. Chemical composition of 2024-T3 aluminium alloy

Stop Al	Cu	Mg	Fe	Si	Mn	Zn	Ti	Cr	Inne
2024-T3	4.35	1.50	0.50	0.50	0.30	0.25	0.15	0.10	0.20

ciężkościami struktur blaszanych usztywnionych przez przetłoczenia wzdłużne. Eksperymentalna weryfikacja różnych kształtów oraz konfiguracji przetłoczeń wymaga zastosowania uniwersalnej metody wraz z uniwersalnym oprzyrządowaniem. Klasyczne kształtowanie plastyczne w układzie stempel-matryca różnych konfiguracji przetłoczeń wiązałoby się z koniecznością wytworzenia ściśle dedykowanego kompletu oprzyrządowania do danej struktury. W związku z powyższym przyjęcie technologii formowania przyrostowego jest ekonomicznie uzasadnione, gdyż oprzyrządowanie sprowadza się tu do uniwersalnej matrycy, a kształt i konfiguracja przetłoczeń determinowane są dzięki zaprogramowaniu ścieżki narzędzia w systemie CAM.

Niniejszy artykuł ma na celu wstępną analizę przyjętej metody do kształtowania usztywnionych struktur blaszanych. W pracy skupiono się na doborze parametrów kształtowania oraz określeniu optymalnej głębokości z punktu widzenia sztywności.

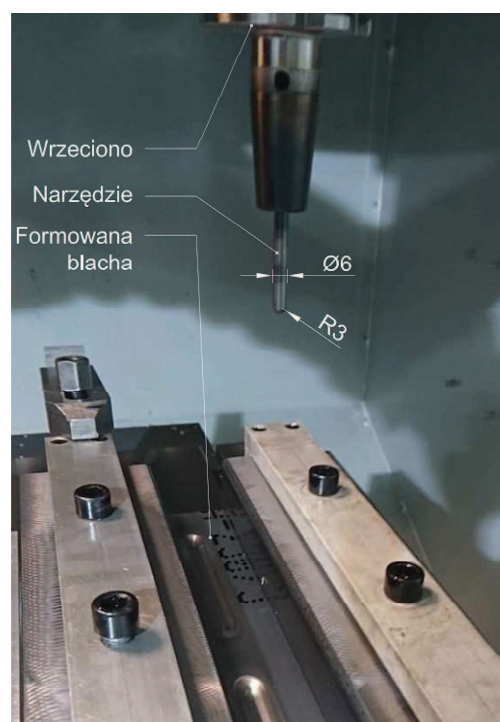
### Metodyka badań

Praca zawiera wyniki badań eksperymentalnych skupionych na wytwarzaniu, w tym wstępnym doborze parametrów technologicznych oraz badaniu sztywności pojedynczych, podłużnych przetłoczeń o różnej głębokości. Kształtowano przetłoczenia o wymiarach i kształcie przedstawionych na rys. 1. Wartość głębokości maksymalnej wyznaczono eksperymentalnie stopniując co 1 mm, aż do momentu pęknięcia blachy.

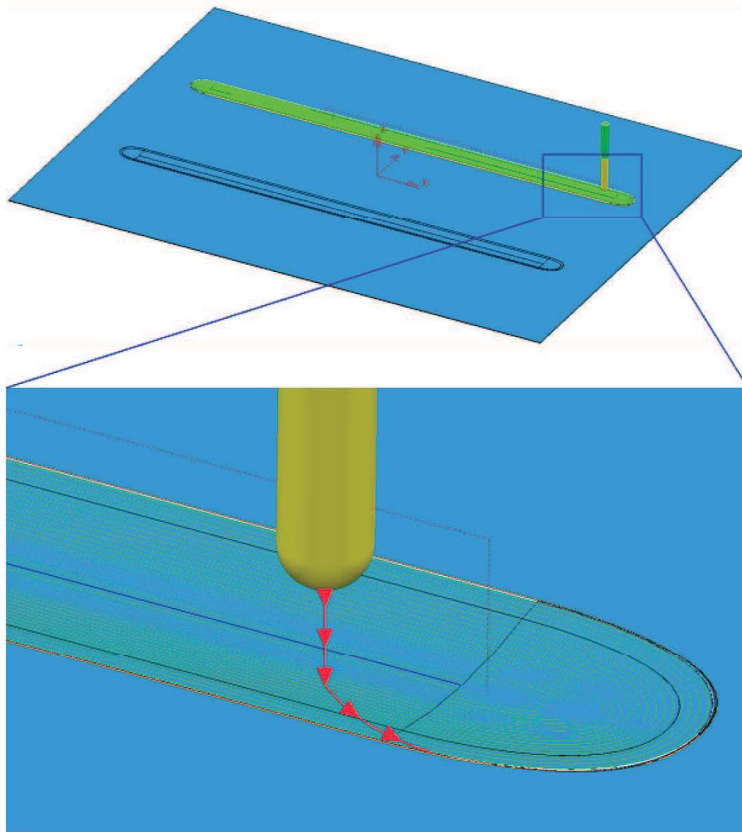
Skład chemiczny zastosowanego materiału przedstawiono w tab. 1. Powszechnie wiadomo, że zastosowany materiał lotniczy, jakim jest stop aluminium 2024-T3

jest trudny do formowania plastycznego, ze względu na wysoką wartość granicy plastyczności w odniesieniu do wytrzymałości na rozciąganie.

Kształtowanie przeprowadzono przy użyciu frezarki numerycznej HAAS Mini Mill stosując przyrząd przedstawiony na rys. 2, zastosowano narzędzie wykonane



Rys. 2. Stanowisko do kształtowania przetłoczeń usztywniających na maszynie numerycznej HAAS  
 Fig. 2. Work-stand on the HAAS CNC machine used for incremental sheet forming



Rys. 3. Przyjęta strategia obróbki – ścieżka narzędzia  
Fig. 3. The shaping strategy – tool path

z węgla spiekane go o średnicy 6 mm. Program sterujący wygenerowano przy użyciu programu CAM – PowerMill. Kształtowanie wykonano dla różnych prędkości obrotowych równych 12000 obr/min oraz 1100 obr/min. Prędkość posuwu w przypadku wariantu wysokoobrotowego była równa 1000 mm/min, z kolei dla niskoobrotowego wariantu 800 mm/min.

Przyjęto widoczną na rys. 3 ścieżkę ruchu narzędzia. Jeden cykl widoczny na rysunku wywołuje zagłębienie blachy o wartości 1 mm. W zależności od wariantu powtarzano cykle do momentu uzyskania określonej głębokości.

Stanowisko do testów wyboczenia przedstawiono na rys. 4. Próby wyboczenia przeprowadzono za pomocą przyrządu wymuszającego obustronne utwierdzenie próbki na maszynie wytrzymałościowej Instron E10000. Badania prowadzono w warunkach otoczenia, w temp. pokojowej przy stałej prędkości posuwu szczęk równej 5mm/min.

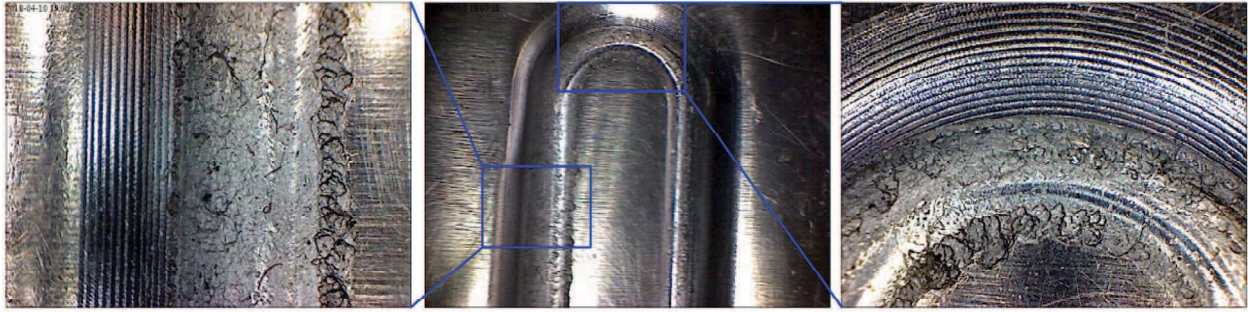
### Wyniki badań

W pierwszym etapie badań zweryfikowano parametry formowania w celu określenia właściwego wariantu do prowadzenia dalszych badań eksperymentalnych. Kształtowanie przetłoczeń przy wysokiej prędkości obrotowej okazało się być niesłuszne w przypadku blachy pokrytej platerem. Podjęto próby kształtowania z zastosowaniem

wysokich obrotów, gdyż oczekiwano, że w takich warunkach dojdzie do wytworzenia odpowiednio wysokiej ilości ciepła na skutek sił tarcia, które z kolei umożliwiłyby łatwiejsze kształtowanie blachy. Jednakże przy obrotach równych 12000 obr/min, dochodziło do zacierania plateru i usuwania go w obszar styku z narzędziem, co w konsekwencji prowadziło do naruszenia struktury kształtowanej blachy na skutek tarcia (rys. 5). W związku z powyższym do dalszych badań zastosowano wyłącznie parametry o niskiej prędkości obrotowej narzędzia równej 1100 obr/min i posuwie 800 mm/min. Przetłoczenia formowano o maksymalnej możliwej do uzyskania głębokości, która wyniosła ok. 5,8 mm. Pod pojęciem maksymalnej możliwej głębokości rozumie się tu wartość głębokości, przy której dochodzi do pęknięcia materiału. Ostatecznie do dalszych badań wykonano próbki o głębokościach od 1 do 5 mm stopniując je, co 1 mm. W tab. 2 usystematyzowano oznaczenia poszczególnych wariantów próbek w zależności od głębokości przetłoczeń. Z kolei na wykresie słupkowym (rys. 6) przedstawiono wyniki badań na wyboczenie dla próbek o rozważanych głębokościach przetłoczeń.



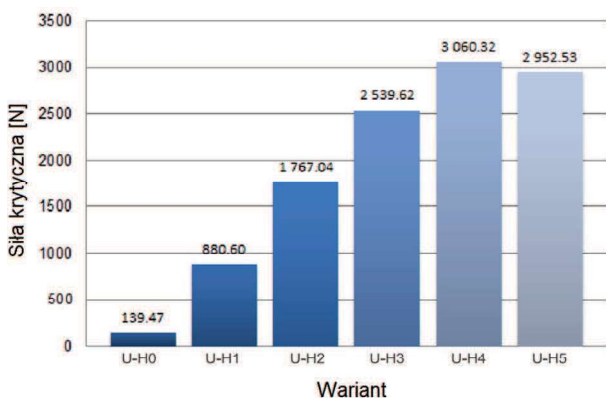
Rys. 4. Widok próbki zamocowanej na stanowisku do próby ściskania (a) oraz schemat obrazujący model utwierdzenia próbki (b)  
Fig. 4. Specimen mounted on the testing machine (a) schematic of loading the specimen during compression test (b)



Rys. 5. Widok zatartej blachy przez narzędzie na skutek zastosowania zbyt wysokiej prędkości obrotowej  
Fig. 5. View of the seized plate by the tool due to the use of a too high rotational speed

Tabela 2. Oznaczenia wariantów próbek w zależności od głębokości przetłoczenia  
Table 2. Marking of specimen variants depending on the depth of the embossing

Symbol wariantu	Głębokość przetłoczenia (mm)
U-H0	0
U-H1	1
U-H2	2
U-H3	3
U-H4	4
U-H5	5



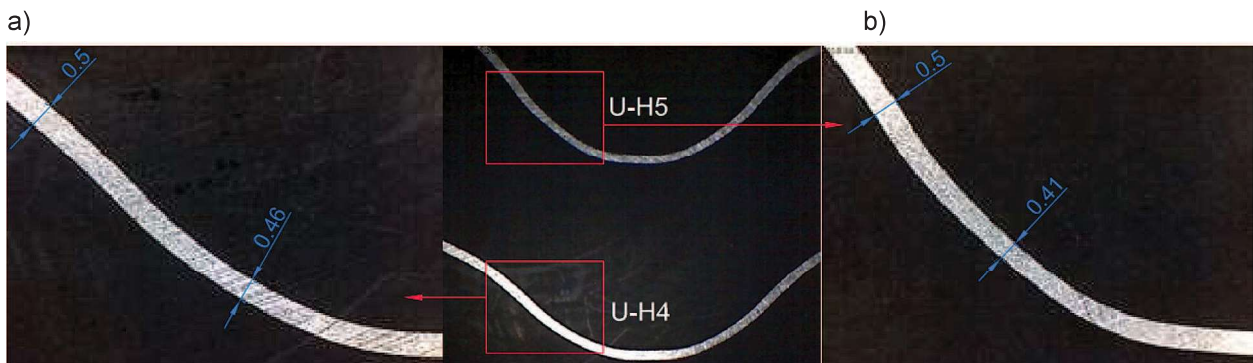
Rys. 6. Wyniki badań na wyboczenie usztywnionych blach  
Fig. 6. Results of buckling tests of stiffened sheets

Analizując wartości sił wyboczenia, a także przebieg krzywych dla poszczególnych wariantów, w zakresie głębokości przetłoczenia od  $H=0$  mm do  $H=4$  mm wykazano spodziewaną tendencję, tj. większa głębokość przetłoczenia skutkuje wyższą siłą krytyczną. Maksymalną wartość siły wywołującej wyboczenie równą 3060,32 N otrzymano dla głębokości 4 mm. Dla głębokości przetłoczenia równej  $H=5$  mm zauważono spadek siły krytycznej o około 4% w porównaniu do głębokości równej  $H=4$  mm. Na podstawie wartości sił krytycznych zaobserwowano również inny charakter zniszczenia.

Granica głębokości, po przekroczeniu, której dochodzi do spadku siły krytycznej w próbie wyboczenia, związana jest ze zmniejszeniem grubości ścianek przetłoczenia. W związku z tym, wykonano zglądy w przekroju poprzecznym przetłoczeń, które następnie poddano pomiarom grubości ścianek. Przedstawiona różnica grubości ścianek dla głębokości przetłoczenia 4 oraz 5 mm wskazuje na zmniejszenie grubości ścianki we wskazanym miejscu (rys. 10). Świadczy to o tym, że dla rozpatrywanego wariantu zastosowanego kształtu nie powinno rozważać się większych głębokości przetłoczenia, gdyż dalsze zagłębienie będzie prowadziło do spadku siły krytycznej przy ściskaniu.

#### Podsumowanie

Podstawowym założeniem w pracy była eksperymentalna weryfikacja możliwości kształtowania przetłoczeń usztywniających metodą kształtowania przyrostowego.



Rys. 7. Widoki przekrojów poprzecznych przetłoczeń dla wariantów U-H4 (a) oraz U-H5 (b)  
Fig. 7. Cross-section views of ribbons for variants U-H4 (a) and U-H5 (b)

Wykazano, że z powodzeniem metodę tę można stosować, jako swego rodzaju technikę rapid prototyping chcąc rozważać w planie badawczym różne konfiguracje, kształty oraz rozmiary przetłoczeń. Tradycyjne formowanie z zastosowaniem indywidualnego, ściśle dedykowanego tłoczniaka dla każdej konfiguracji przetłoczenia byłaby nieuzasadniona ekonomicznie. W zaprezentowanej metodzie mamy do czynienia z kolei z relatywnie tanią, uniwersalną matrycą oraz prostym narzędziem, które wytwarza przetłoczenie zdeterminowane przez zadany program sterujący obrabiarki numerycznej. Wprawdzie wytwarzanie takich przetłoczeń zaprezentowaną technologią jest czasochłonne, gdyż maszynowy czas formowania przetłoczenia o długości 120 mm, szerokości 20 mm oraz głębokości 4 mm trwa ok. 20 min. przy zastosowaniu proponowanych parametrów obróbki. Jednakże dla celów badawczych jest to metoda efektywna ze względu na jej elastyczność, możliwość manipulowania kształtem, czy konfiguracją formowanych struktur.

Pewnym utrudnieniem w przedstawionej obróbce okazał się plater, który uległ zacieraniu przy wysokich obrotach. Obróbka wysokoobrotowa została tu świadomie poddana weryfikacji i może być atrakcyjna z punktu widzenia dalszych badań, gdyż taki wariant prowadzi do lokalnego wygenerowania ciepła na skutek tarcia narzędzia o powierzchnię kształtowaną. Odpowiednia ilość ciepła może korzystnie przełożyć się na warunki plastycznego formowania blachy, która wykonana jest z materiału z założenia trudnego do przeróbki plastycznej – stopu aluminium 2024-T3. Jednakże, by móc stosować wysokoobrotową obróbkę, należy szczegółowo zdeterminować właściwości tribologiczne pary cieiernej stanowiącej przez materiał kształtowany i narzędzie.

## LITERATURA

- [1] Bagudanch I., et. al. 2017. "Revisiting formability and failure of polymeric sheets deformed by Single Point Incremental Forming". *Polymer Degradation and Stability* 144: 366–377.
- [2] Centeno G. et. al. 2017. "Recent approaches for the manufacturing of polymeric cranial prostheses by Incremental Sheet Forming". *Procedia Engineering* (183): 180–187.
- [3] Devarajan N. et. al. 2014. "Complex incremental sheet forming using back die support on aluminium 2024, 5083 and 7075 alloys". *Procedia Engineering* (81): 2298–2304.
- [4] Emmens W.C. 2010. "The technology of Incremental Sheet Forming – A brief review of the history". *Journal of Materials Processing Technology* (210): 981–997.
- [5] Jackson K.P., Allwood J.M., Landert M. 2008. "Incremental Forming of Sandwich Panels". *Journal of Materials Processing Technology* (204/1–3): 290–303.
- [6] Jadhav S. et. al. 2003. "Process optimization and control for incremental forming sheet metal forming". Proceedings of the International Deep Drawing Research Group Conference, IDDRG, Bled, Slovenia, 165–171.
- [7] Jeswiet J. 2005. "Asymmetric single point incremental forming of sheet metal". *Annals of CIRP* Vol. 54 (2): 623–650.
- [8] Le V.S., Ghiotti A., Lucchetta G. 2008. "Preliminary Studies on Single Point Incremental Forming for Thermoplastic Materials". *International Journal of Material Forming* (1): 1179–1182.
- [9] Marques T.A., Silva M.B., Martins P.A.F. 2012. "On the potential of single point incremental forming of sheet polymer parts". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 60, issue 1–4: 75–86.
- [10] Naranjo J. et. al. 2017. "Influence of temperature on alloy Ti6Al4V formability during the warm SPIF process". *Procedia Engineering* (207): 866–871.
- [11] Raju C., Haloi N., Narayanan C.S. 2017. "Strain distribution and failure mode in single point incremental forming (SPIF) of multiple commercially pure aluminum sheets". *Journal of Manufacturing Processes* (30): 328–335.
- [12] Sá de Farias J. 2014. "Towards smart manufacturing techniques using incremental sheet forming". *Smart manufacturing innovation and transformation: Interconnection and Intelligence*, IGI Global.
- [13] Salem E. 2016. "Investigation of thickness variation in single point incremental forming". *Procedia Manufacturing* Vol. 5: 828–837.
- [14] Shim M.S., Park J.J. 2001. "The formability of aluminum sheet in incremental forming". *Journal of Material Processing Technology* Vol. 113, Issue 1–3: 654–658.

dr inż. Andrzej Kubit – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Politechniki Rzeszowskiej, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: akubit@prz.edu.pl

dr inż. Dawid Wydrzyński – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Politechniki Rzeszowskiej, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: dwydrzynski@prz.edu.pl

dr inż. Magdalena Bucior – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Politechniki Rzeszowskiej, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: magdabucior@prz.edu.pl

dr inż. Rafał Kluz – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Politechniki Rzeszowskiej, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: rkluz@prz.edu.pl