Projekt kluczowy
Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ ROZWOJU REGIONALNEGO

SPOTKANIE PANELI EKSPERTÓW
28-29 Czerwca 2010

ZB 8

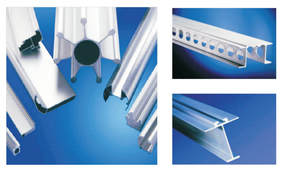
Plastyczne kształtowanie lotniczych stopów Al (w tym Al-Li) oraz Ti

Politechnika Śląska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Lubelska, Politechnika Warszawska, Politechnika Częstochowska

Wyniki badań

Wyciskanie lotniczych kształtowników ze stopów aluminium

Materiały lotnicze na bazie Al posiadają wiele cech szczególnych, które predestynują te materiały do produkcji elementów konstrukcyjnych obiektów latających. Wymagania stawiane tym materiałom to zdolność przenoszenia obciążeń w zadanych warunkach eksploatacji przy możliwie małych wymiarach i masie konstrukcji, podatność na przetwarzanie (lejność, plastyczność, skrawalność itp.), zapewnienie dużej trwałości i niezawodności elementów oraz podzespołów.
W przypadku wyciskania profili z Al o zróżnicowanej grubości ścianek (rys.1), zwłaszcza tych skomplikowanych i zawierających w przekroju elementy cienkościenne, występują trudności związane
z uzyskaniem odpowiedniej stateczności kształtu, stabilności wymiarów, jakości powierzchni oraz jednorodnej struktury i własności wyrobu.



Rodzaj stopu	Własności mechaniczne				
	R_m [MPa]	$R_{0,2}$ [MPa]	A_5 [%]	A_{10} [%]	HB
2017 A	380	250	12	10	105
2024	430	290	10	8	115
2618A	390	310	6	-	105
2014	440	360	8	7	110
5251	150	60	16	14	40
5754	180	60	15	13	45
5005	100	40	17	15	30
6082	200	100	12	10	60
6101A	200	170	10	-	71
8090	400	300	4	-	91

Rys. 1. Przykłady kształtowników wyciskanych stosowanych w konstrukcjach lotniczych oraz podstawowe właściwości mechaniczne wybranych stopów Al stosowanych w lotnictwie.

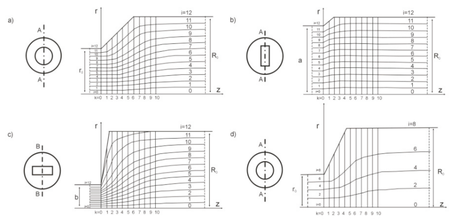
Z uwagi na wysokie wymagania stawiane własnościom wyrobów wyciskanych stosowanych na elementy lotnicze (stabilność własności i struktury danego elementu w szerokim zakresie temperatur już od ok. –70 C), szczególne znaczenie ma dobór ścisłych parametrów technologicznych. Kontrolowanie i wymuszanie określonych zmian struktury metalu w procesie wyciskania
w powiązaniu z płynięciem wyciskanego metalu jest niezwykle istotne zwłaszcza w przypadku lotniczych stopów aluminium o złożonym kształcie przekroju poprzecznego. Szczególnego znaczenia nabierają badania zmierzające do takich rozwiązań konstrukcyjno-technologicznych, które pozwoliłyby na produkcję wyrobów o bardzo skomplikowanych kształtach, o wysokich dokładnościach wymiarowych, jednorodnej strukturze, wysokich właściwościach mechanicznych oraz odpowiedniej jakości powierzchni. Jest to istotne z uwagi na cechy stopów lotniczych na bazie stopów lekkich w tym Al i otrzymanie pożądanego efektu dokładnego odwzorowania kształtu (np. krawędzie, dokładność wymiarowa ścianek, prostoliniowość wyrobu bądź celowa krzywoliniowość) oraz pożądanego rozkładu własności na przekroju poprzecznym i podłużnym wyrobu, odpowiedniej mikrostruktury.

Koncepcja funkcji prądu w analizie kinematyki plastycznego płynięcia w procesie wyciskania kształtowników

Metoda funkcji prądu w analizie mechaniki plastycznego płynięcia stopów Al do zastosowań lotniczych, podczas wyciskania profili o złożonym kształcie przekroju poprzecznego pozwala na uwzględnienie aspektu współzależności między zidentyfikowanymi parametrami stref odkształcenia w powiązaniu z siłą wyciskania i określonymi wskaźnikami kształtu przekroju poprzecznego wyciskanego wyrobu.

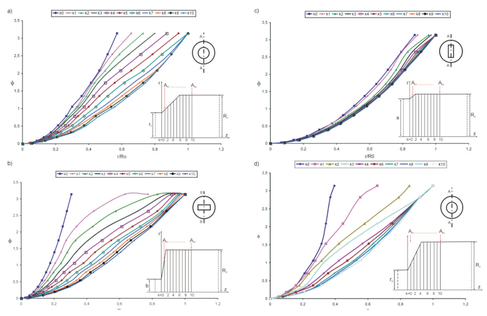
Doświadczalne określenie linii płynięcia (prądu) z zastosowaniem materiału modelowego (Pb1) oraz stopu Al. (PA6)

Za linie prądu dla analizowanych próbek przyjęto zdeformowane linie wzdłużne początkowo kwadratowej siatki (rys. 2).

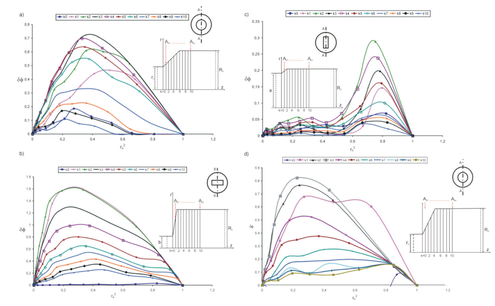


Rys.2. Linie prądu dla analizowanych wyciskanych próbek o przekroju poprzecznym: a) okrągłym - Pb1, b) prostokątnym (przekrój A-A) - Pb1, c) prostokątnym (przekrój B-B) - Pb1, d) okrągłym - PA6.

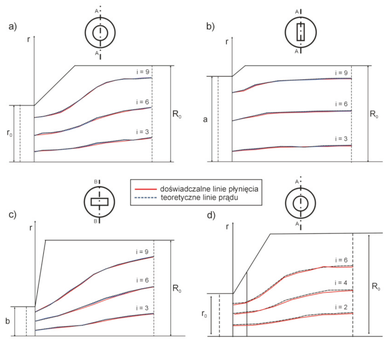
Rozkład funkcji prądu w obszarach uplastycznienia



Rys. 3. Przebiegi bezwymiarowej funkcji prądu (r,z) w zależności od r/R_0 : a) przekrój kołowy - Pb1, b) przekrój prostokątny A-A- Pb1, c) przekrój prostokątny B-B - Pb1, d) przekrój kołowy - PA6.



Rys. 4. Zależność składowej funkcji prądu: a) przekrój kołowy - Pb1, b) przekrój prostokątny A-A- Pb1, c) przekrój prostokątny B-B - Pb1, d) przekrój kołowy - PA6.



Rys. 5. Porównanie teoretycznych linii prądu i doświadczalnych linii płynięcia: a) profil kołowy – Pb1, b) profil prostokątny (przekrój A-A) – Pb1, c) profil prostokątny (przekrój B-B) – Pb1, d) profil kołowy – PA6.

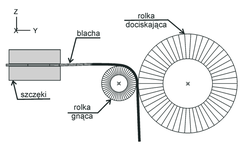
Wnioski

Doświadczalne przebiegi funkcji prądu stanowią bezpośrednią praktyczną wskazówkę do teoretycznego opisu procesu wyciskania. Kształt teoretycznych linii prądu niewiele odbiega od eksperymentalnych, różniąc się głównie w rejonie naroża przy wejściu w obszar płynięcia plastycznego. W pozostałym obszarze obserwuje się dobrą zgodność obydwu przebiegów – teoretycznego i eksperymentalnego. Teoretycznie określone linie prądu mogą służyć do przewidywania schematów plastycznego płynięcia materiału w procesie wyciskania kształtowników, co znajduje szczególne uzasadnienie w modelowaniu płynięcia stopów o mniej regularnym typie płynięcia, stosunkowo małym zakresie plastyczności oraz na ogół złożonym kształcie, co cechuje materiały i profile lotnicze. Wyniki metody funkcji prądu w poszukiwaniu dokładnego opisu mechaniki plastycznego płynięcia potwierdzają celowość jej zastosowania w odniesieniu do materiałów wymagających szczególnej uwagi z powodu złożonych schematów płynięcia będących konsekwencją własności stopów Al, koniecznością spełnienia wysokich wymagań odnośnie cech finalnych (geometrycznych, mechanicznych, strukturalnych) wyrobu wyciskanego jako profilu lotniczego. Metoda jest czuła na zidentyfikowanie obszarów uplastycznienia oraz cech przebiegu linii prądu odzwierciedlających rzeczywisty ich przebieg. Stanowi to podstawę adekwatnego modelowania procesu wyciskania profili o wysokich wymaganiach eksploatacyjnych.

Wyniki badań

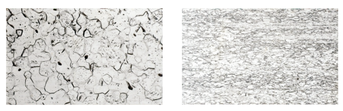
Symulacja procesu gięcia blach tytanowych

Model numeryczny odzwierciedla proces gięcia w przyrządzie przedstawionym na rysunku 2.
2D model procesu gięcia, 2332 węzły, 482 elementy typu 2D-solid;
Narzędzie: sprężysty model materiału Odkształcany materiał: sprężysto-plastyczny model, oparty na warunku plastyczności von Misesa, stowarzyszonym z prawem plastycznego płynięcia, wykorzystującym funkcję plastyczności von Misesa i zasadę izotropowego umocnienia.



Rys. 1. Model numeryczny

Rys. 2. Widok przyrządu do gięcia



Rys. 3. Mikrostruktura blachy tytanowej: a) Grade 2, b) Grade 5; mikroskop świetlny, pow. 200x

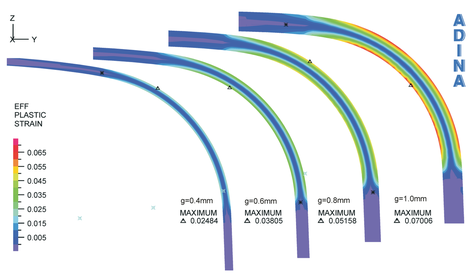
Tabela 1. Skład chemiczny analizowanych blach

Material	Zawartość procentowa pierwiastka, % wt.								
	Al	V	C	Fe	Y	O	N	H	Ti
Grade 2	-	-	0.014	0.08	-	0.11	0.005	0.0022-0.0032	reszta
Grade 5 (Ti-6Al-4V)	6.3	4.1	0.003	0.2	<0.006	0.02	0.006	0.001	reszta

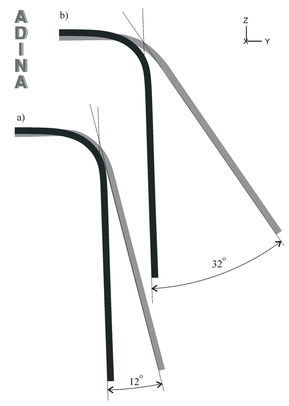
Tabela 2. Właściwości mechaniczne analizowanych blach

Material	Granica plastyczności R_{02}, MPa	Wytrzymałość na rozciąganie R_m, MPa	Wydłużenie A_{10}, %	Wykładnik umocnienia *n*	Stała materiałowa *C*, MPa
Grade 2	368	522	37	0.18	822
Grade 5 (Ti-6Al-4V)	999	1048	9	0.05	1338

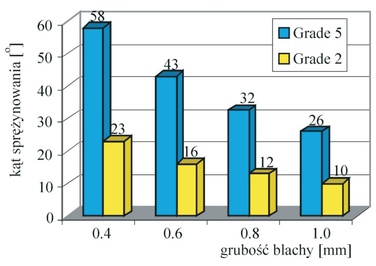
Wyniki obliczeń numerycznych



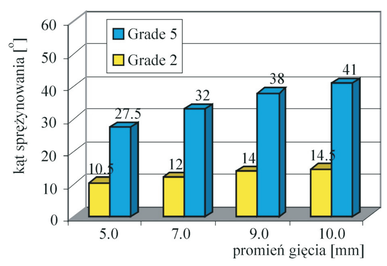
Rys. 4. Rozkład odkształceń plastycznych w giętych próbkach



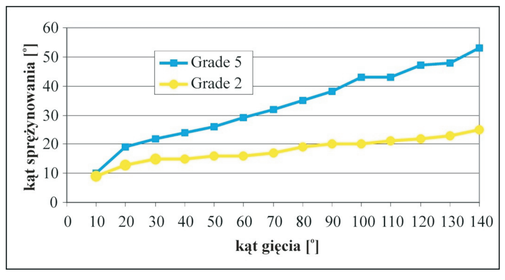
Rys. 5. Kąt sprężynowania blach Grade 2 (a) oraz Grade 5 (b); grubość blachy 0,8 mm, promień gięcia r_g=7mm, kąt gięcia – α=90°



Rys. 6. Kąt sprężynowania w funkcji grubości blachy; promień gięcia –7mm, kąt gięcia – α=90°



Rys. 7. Kąt sprężynowania w funkcji promienia gięcia; grubość blachy – 0,8mm, kąt gięcia – α=90°



Rys. 8. Kąt sprężynowania w funkcji kąta gięcia (wyniki badań doświadczalnych); grubość blachy 0,8 mm, promień gięcia r_g=7mm

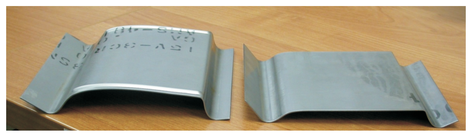
Wnioski

- W minionym okresie przeprowadzono wstępne symulacje numeryczne procesu gięcia blach tytanowych z wykorzystaniem programu ADINA v. 8.6 oraz szereg badań doświadczalnych w celu określenia sprężynowania powrotnego blach tytanowych. Przeprowadzone analizy numeryczne i badania doświadczalne stanowiły podstawę do zaproponowania wykonywania tytanowych osłon o stałym przekroju metodą gięcia na rolkach lub w specjalnych przyrządach do gięcia. Dotychczasowy brak wiedzy w zakresie wielkości kąta sprężynowania uniemożliwiał właściwe projektowanie procesu kształtowania elementów tytanowych.
- W wyniku przeprowadzonych obliczeń numerycznych procesu gięcia stwierdzono, że:

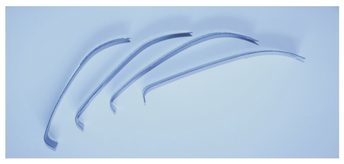
- zjawisko sprężynowania zależy od wielkości środkowej warstwy materiału, która w trakcie procesu gięcia nie ulega odkształceniu plastycznemu, a ta z kolei silnie zależy od: rodzaju materiału, promienia gięcia i grubości giętego materiału.
- im wyższa granica plastyczności tym intensywniejsze zjawisko sprężynowania powrotnego; z analizowanych przypadków wynika, że największe sprężynowanie powrotne zarejestrowano, w przypadku gięcia blachy Ti6Al4V (Grade 5) o grubości 0,4 mm na rolkach o promieniu gięcia r_g=7mm – wówczas kąt sprężynowania wynosił 58°, podczas gdy dla blachy z czystego tytanu technicznego Grade 2 zaledwie 23°. To wskazuje jak trudne jest kształtowanie blach tytanowych, zwłaszcza ze stopów tytanu.

- W chwili obecnej prowadzane są analizy numeryczne procesu kształtowania blach tytanowych z wykorzystaniem zakupionego programu PAMStamp, a niezbędne do symulacji numerycznych dane materiałowe są wyznaczane doświadczalnie na materiałach zakupionych w ramach Projektu.

Przykłady zastosowania w lotnictwie



Przykładowe stalowe elementy osłonowe, które docelowo mają być zastąpione elementami tytanowymi



Profil osłony tytanowej – badania doświadczalne

Przeprowadzone badania wykazały, że istnieje możliwość kształtowania tytanowych elementów osłonowych o stałym przekroju metodą gięcia na rolkach.
Konieczne jest uwzględnienie wyjątkowo intensywnego zjawiska sprężynowania blach tytanowych, które zależy od wielkości środkowej strefy materiału, pozostającej w stanie sprężystym. Wielkość tej strefy zależy od rodzaju materiału, promienia gięcia i grubości giętej blachy.

Przykłady współpracy z przemysłem lotniczym

- **WSK Rzeszów**

W trakcie ostatniej wizyty (08.04.2010) w WSK Rzeszów zaproponowano kształtowanie osłon tytanowych o stałym przekroju profilu metodą gięcia na rolkach, pokazano wyniki badań doświadczalnych z gięcia profili tytanowych przedstawicielom WSK Rzeszów.
Ponadto uzgodniono, że w Politechnice Częstochowskiej zostaną przeprowadzone próby symulacji tłoczenia przy użyciu programu PAMSTAMP dla geometrii wskazanej przez WSK Rzeszów.- symulacje te są wykonywane, a wyniki konsultowane z przedstawicielami WSK Rzeszów.

Wskaźniki realizacji celów projektu

Referaty

- Lacki P.: ***Analiza numeryczna procesu wyciskania przeciwbieżnego z udziałem tarcia aktywnego***. Materiały XVIII Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej: „Konstrukcja i Technologia Wytłoczek i Wyprasek", Poznań-Wąsowo 9-11.VI.2010, s.123-132
- Malinowicz A., Adamus J.: ***Analiza właściwości sprężystych blachy tytanowej Ti6Al4V.*** Materiały XVIII Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej: „Konstrukcja i Technologia Wytłoczek i Wyprasek", Poznań-Wąsowo 9-11.VI.2010, s.179-181
- Pawłowska B., Śliwa R.: ***Plastyczne płynięcie lotniczych stopów aluminium w procesie wyciskania wyrobów o złożonym kształcie przekroju poprzecznego***. XIII Konferencja KM PAN "Metalurgia 2010"

Publikacje

- Adamus J., Lacki P., Motyka M.: ***Analysis of titanium sheet bending process***. Inżynieria Materiałowa, 2010, w druku

Prace mgr, dr, hab.

Prace magisterskie obronione:

- Jacek Kubicki: ***Komputerowe wspomaganie procesu tłoczenia wytłoczki osiowo-symetrycznej.*** Promotor: Piotr Lacki, data obrony 25.VI.2010

Prace magisterskie planowane

- Robert Wilczarski: ***Tytan i jego stopy w przemyśle lotniczym***. promotor: Janina Adamus
- Radosław Podlewski: ***Aluminium i jego stopy w przemyśle lotniczym***. promotor: Janina Adamus
- Krzysztof Wróż: ***Aluminium i tytan jako materiały alternatywne dla stali – zastosowania lotnicze***. promotor: Janina Adamus
- Tomasz Nikisz: ***Zastosowanie krzywych odkształceń granicznych do oceny właściwości plastycznych blach.***, promotor: Janina Adamus

Prace habilitacyjne

Tytuł: ***Analiza kształtowania wyrobów tytanowych metodami obróbki plastycznej na zimno***
Autor: dr inż. Janina Adamus
Status: Monografia Nr 174

Tytuł: ***Modelowanie tarcia w procesach objętościowej obróbki plastycznej***
Autor: dr inż. Piotr Lacki
Status: Monografia Nr 169

PROJEKT WSPÓŁFINANSOWANY PRZEZ UNIĘ EUROPEJSKĄ ZE ŚRODKÓW EUROPEJSKIEGO FUNDUSZU ROZWOJU REGIONALNEGO