

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

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

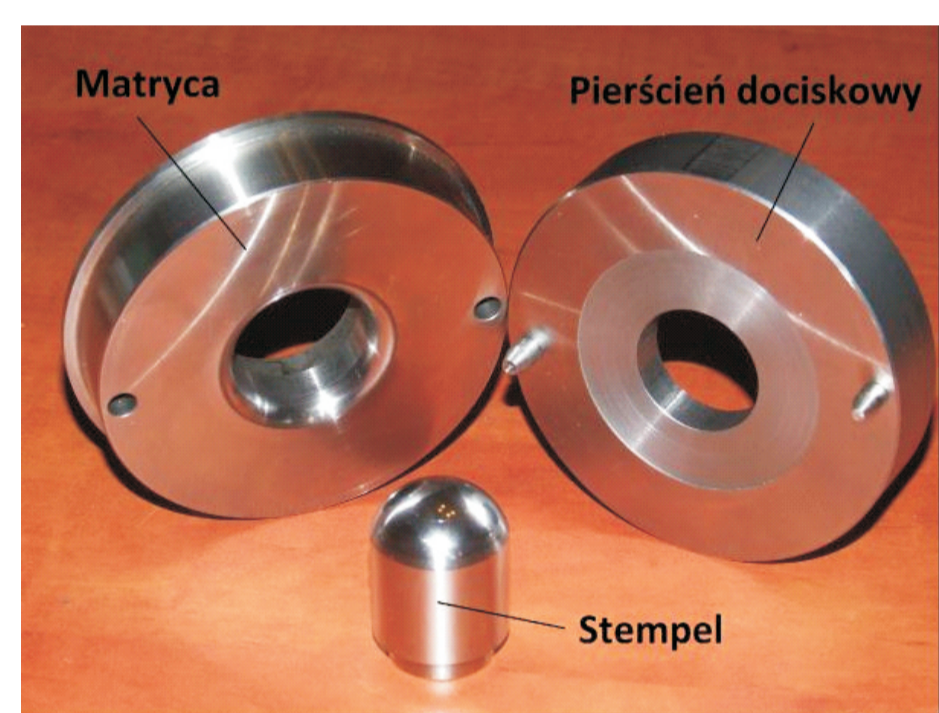
Wyniki badań

Wyznaczenie KOG – wprowadzenie

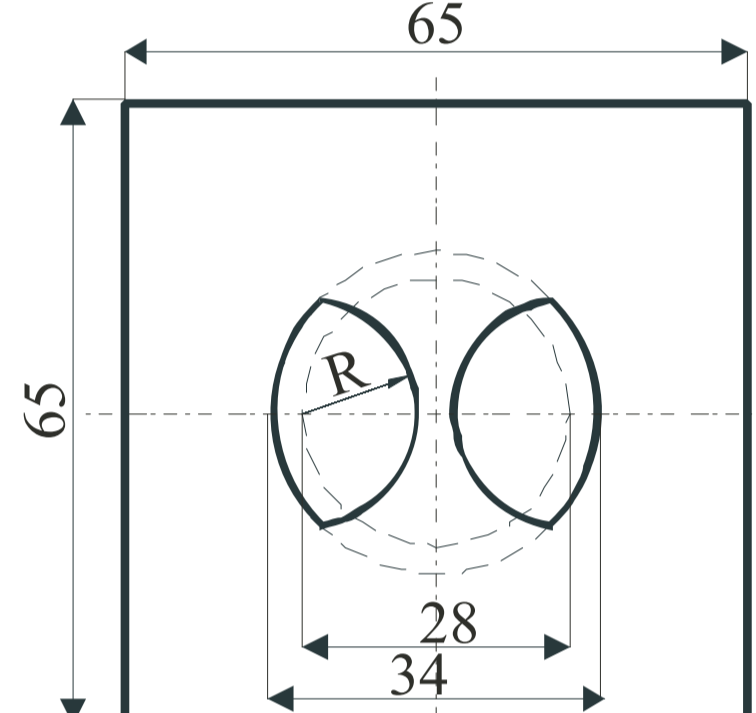
Ważnym pojęciem charakteryzującym przydatność blach do operacji kształtowania jest tłoćność. Trudność w ocenie tłoćności blach polega na tym, że nie jest to pojęcie charakteryzujące dany materiał jako jego cecha, i zależy zarówno od właściwości materiału, jak i od sposobu i warunków odkształcania. W przypadku kształtowania wytlóćczek o skomplikowanej geometrii ocenę przydatności blachy do operacji tłoćczenia przeprowadza się na podstawie badań doświadczalnych, pozwalających na określenie właściwości mechanicznych blachy w połączeniu z symulacją numeryczną obciążenia materiału. Metoda ta polega na porównawczych badaniach stanu odkształcenia wytlóćczek z krzywą odkształceń granicznych (KOG) blachy. Miarą tłoćności jest odkształcenie graniczne, przy którym następuje utrata stateczności. Znajomość tego odkształcenia pozwala na porównanie go z wartościami maksymalnych odkształceń w projektowanej wytlóćczce. Ocena taka informuje, czy odkształcenia maksymalne w wytlóćczce są mniejsze, czy też większe od granicznych odkształceń blachy, a więc czy leżą w strefie odkształceń bezpiecznych, czy też w strefie niebezpiecznej, co prowadzi do pęknięcia wytlóćczki. Znajomość KOG pozwala również, poprzez odpowiednie oddziaływanie na warunki tłoćczenia np. siłę docisku lub smarowanie, zmniejszyć ryzyko pęknięcia wytlóćczki.

Modernizacja stanowiska do wyznaczania KOG

W związku z tym, że obecne badania prowadzone są na blachach tytanowych, których koszt znacznie przekracza koszt typowych blach stalowych głęboko-tłoćczonych, przeprowadzono modernizację stanowiska do wyznaczania KOG. Zaprojektowano i wykonano mniejszy gabarytowo tłoćcznik (rys. 1). Opracowano nowy zestaw próbek do wyznaczania KOG, których kształt i wymiary podano na rys. 2 i w tabeli 1. Stanowisko do nanoszenia siatek pomiarowych na blachę przedstawia rys. 3. Widok próbki po operacji tłoćczenia ze schematycznym zaznaczeniem oczek pomiarowych i ich średnic przed i po odkształceniu ilustruje rys. 4.



Rys. 1. Widok tłoćcznika opracowanego w celu wyznaczania krzywych odkształceń granicznych



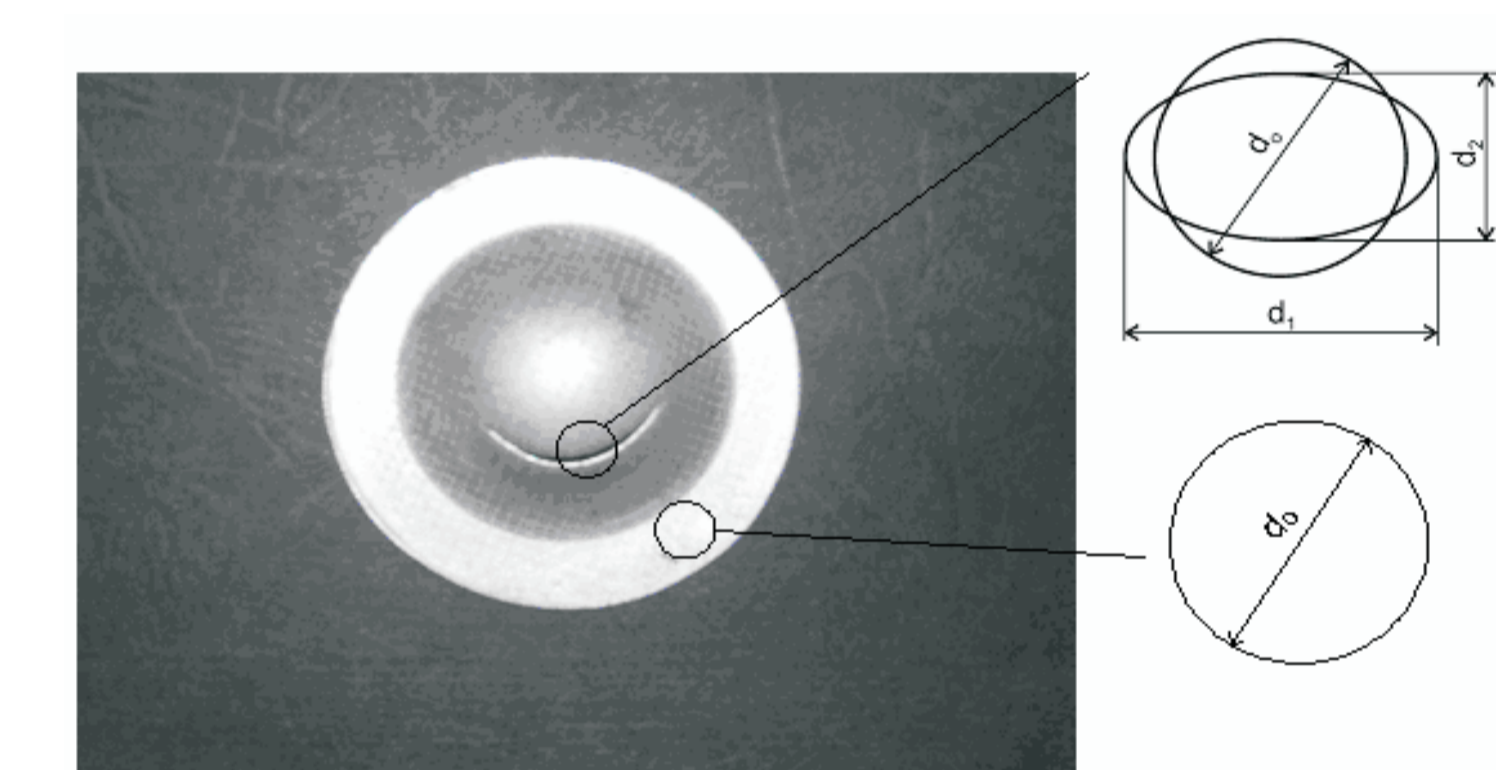
Rys. 2. Kształt i wymiary próbek do wyznaczania KOG

Tab. 1. Wielkość zastosowanych promieni wycięć w próbkach kwadratowych do wyznaczania KOG

Nr próbki	1	2	3	4	5	6
R [mm]	0	8	9	10	11	12



Rys. 3. Widok stanowiska do nanoszenia siatek pomiarowych: 1 - zespół zasilający, 2 - walek do nanoszenia siatek, 3 - przewody przyłączeniowe, 4 - wzorzec siatki, 5 - materiał - blacha, na którą nanoszono siatki



Rys. 4. Widok próbki pełnej po tłoćczeniu, ze schematycznym zaznaczeniem oczek siatki przed i po odkształceniu

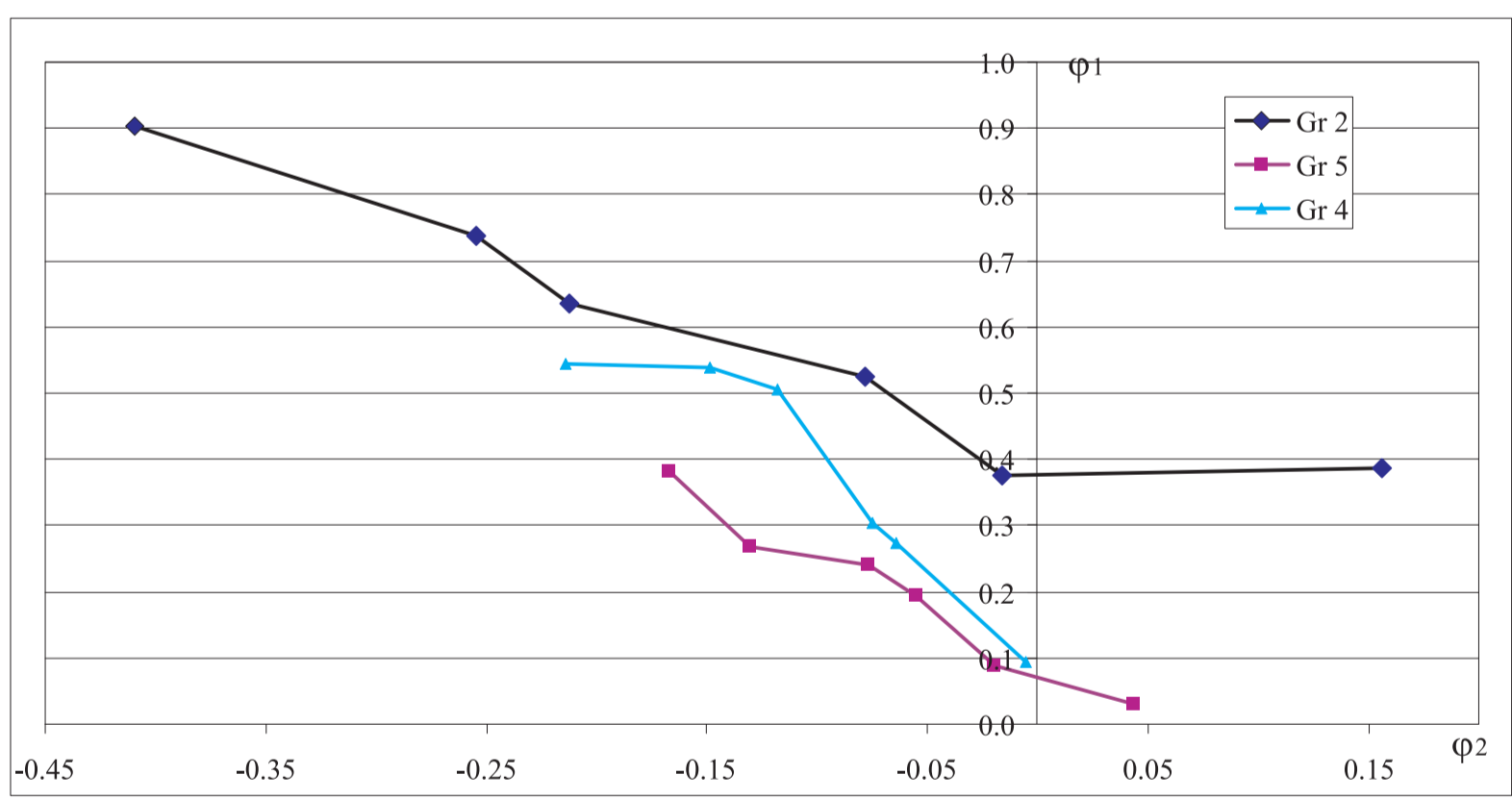
Na podstawie dokonanych pomiarów wyznaczono odkształcenia główne z następujących zależności:

$$\varphi_1 = 1 \ln \frac{d_1}{d_0} - \text{największe odkształcenie główne w płaszczyźnie kształtowanej blachy,}$$

$$\varphi_2 = 1 \ln \frac{d_2}{d_0} - \text{najmniejsze odkształcenie główne w płaszczyźnie kształtowanej blachy,}$$

gdzie: d_0 - początkowa długość bazy pomiarowej, d_1, d_2 - długość bazy po odkształceniu.

KOG wykreslano przez połączenie punktów pomiarowych odkształceń głównych w płaszczyźnie blachy, mierzonych na próbkach w miejscach ich pęknięcia. Zestawienie KOG badanych blach przedstawia rys. 5.



Rys. 5. Zestawienie krzywych odkształceń granicznych badanych blach tytanowych

Wnioski

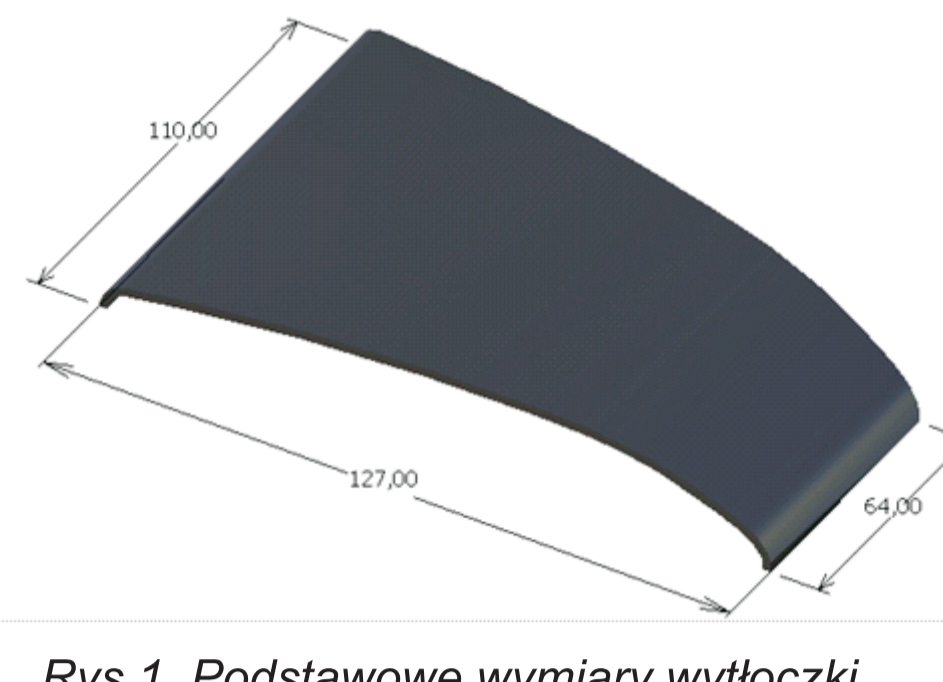
Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych wyznaczono KOG tytanowych blach: Gr 2, 4 i 5 o grubości 0,8 mm. Z wyznaczonych doświadczalnie krzywych wynika, że:

- KOG blachy Gr 2 jest położona najwyżej spośród badanych blach. Odkształcenie w najniższym punkcie tej krzywej wynosi $\varphi_1=0,38$ i jest mniejsze od wykresów tytanowych blach głęboko tłoćczonych, co oznacza, że w temperaturze otoczenia z analizowanej blachy można kształtować niezbyt głębokie wytlóćczki o prostej geometrii,
- KOG blachy Gr 4 i Gr 5 wskazują na bardzo niską tłoćność tych blach.
- Wyznaczone KOG będą wykorzystywane do:
 - określenia stopnia wyteżenia materiału wytlóćczki, a co za tym idzie będzie można uzyskać wskazówkę o pewności technologicznej danej operacji,
 - oceny skłonności do faldowania blachy oraz położenia miejsca, w którym może wystąpić pęknięcie materiału,
 - oceny warunków tłoćczenia, takich jak: wielkość docisku, intensywność płynięcia materiału przez progi ciagowe, wielkość oporów tarcia
- podczas symulacji numerycznych kształtowania wyrobów powłokowych za pomocą programu PAMStamp 2G, zakupionego przez IOPIJIB Politechniki Częstochowskiej w ramach Projektu.

Wyniki badań

Analiza numeryczna tłoćczenia na zimno owiewki wykonanej z blachy tytanowej Grade 2

Praca jest realizowana w oparciu o problem zgłoszony przez WSK Rzeszów. Zagadnienie dotyczy wykonania owiewki silnika lotniczego z materiału lżejszego od tych samych lub wyższych parametrach mechanicznych niż dotychczas stosowany. Aktualnie owiewka wykonywana jest ze stali, a dla uniknięcia sprężynowania powrotnego proces kształtowania prowadzony jest w podwyższonej temperaturze. Celem prowadzonych analiz jest uzyskanie wytlóćczki z czystego tytanu technicznego Gr 2, w której sprężynowanie materiału mieści się w zadanej tolerancji wymiarowej. W dalszej perspektywie należy opracować proces kształtowania wytlóćczki z materiałów takich jak: stopy aluminium i tytanu. W pracy przeprowadzono analizę możliwości wykonania owiewki w procesie wieloperacyjnego tłoćczenia na zimno. Określono niezbędne parametry procesu takie jak: właściwości materiału, geometria wytlóćczki, siła docisku, zmiana kształtu wytlóćczki po procesie tłoćczenia w stosunku do kształtu nominalnego, wielkość odkształceń głównych z zaznaczeniem KOG.



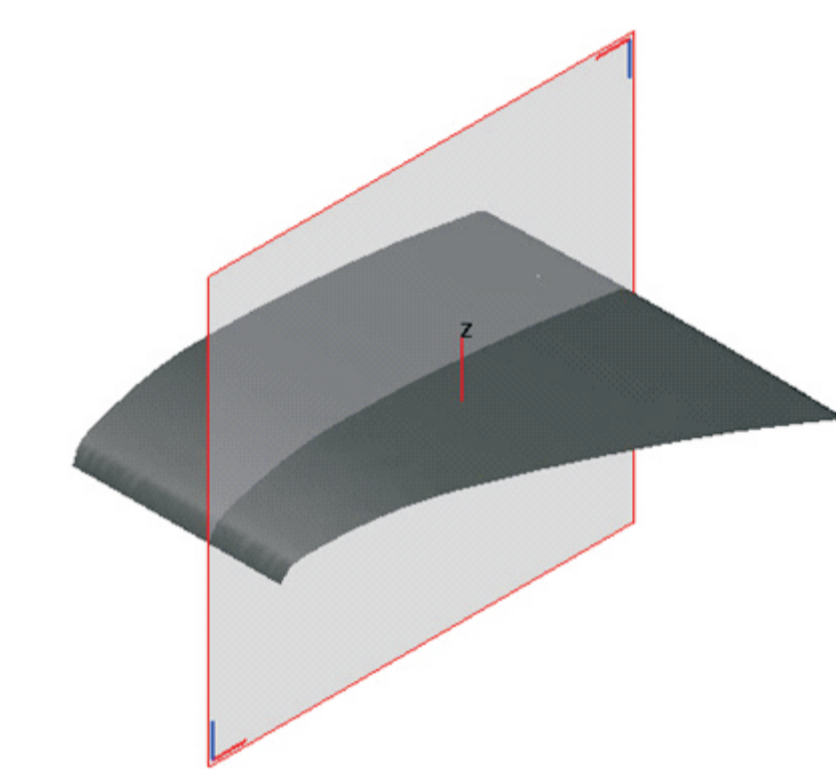
Rys. 1. Podstawowe wymiary wytlóćczki

Symulację procesu tłoćczenia prowadzono przy zastosowaniu MES. Blachę zamodelowano używając elementów typu shell, natomiast narzędzia przyjęto jako sztywne i nieodkształcalne powłoki. Przyjęto sprężysto-plastyczny model materiału blachy, uwzględniając jej anizotropię. Zamodelowano dwie operacje tłoćczenia w których zmieniała się geometria kształtującego narzędzia, przy czym wielkości pocienienia blachy i odkształcenia plastyczne uzyskane w poprzedniej operacji przechodziły do kolejnej operacji.

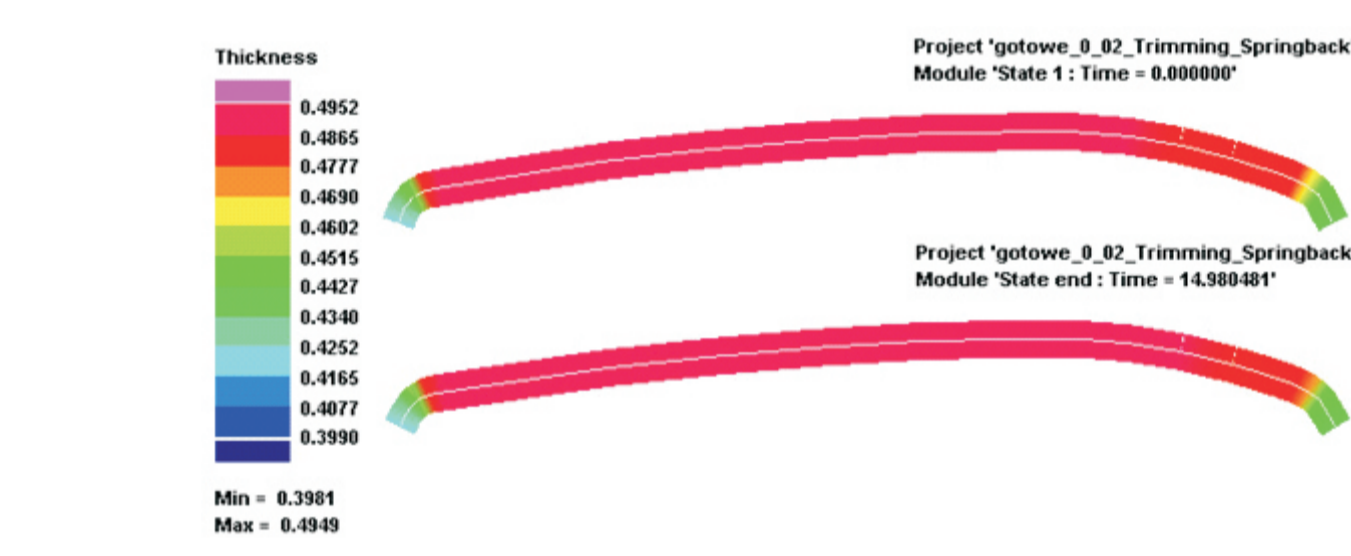
Jako kryterium poprawności procesu tłoćczenia przyjęto KOG blachy Gr 2 o grubości $g=0,5\text{mm}$ oraz wymagania odbiorcy, aby minimalna grubość gotowego elementu nie była mniejsza niż $G>0,4\text{mm}$. Kryteria te sprawdzano po każdym etapie symulacji numerycznej. Opory tarcia w symulacji numerycznej uwzględniono poprzez zmianę współczynnika tarcia. W ramach analizy przeprowadzono symulację tłoćczenia blachy tytanowej Gr 2 z wykorzystaniem progów ciagowych oraz siły docisku 200 kN. Następnie przeprowadzono dwukrotne przycinanie blachy z uwzględnieniem sprężynowania. W Tabeli przedstawiono charakterystyczne wyniki obliczeń zestawione dla procesu cięcia.

Tabela 1. Podstawowe wyniki obliczeń numerycznych blachy po dwóch procesach przycinania

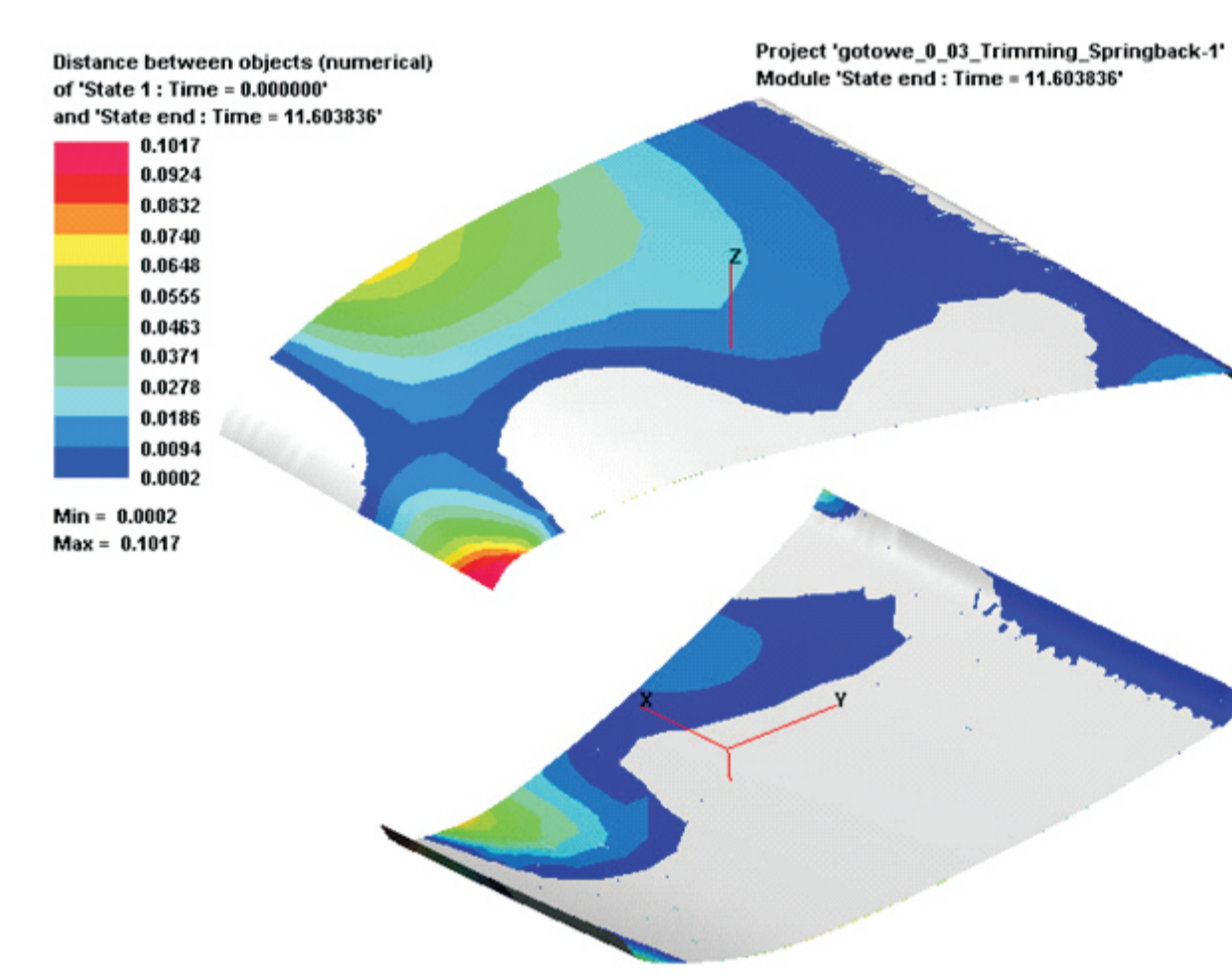
Parametry	Pierwsze przycięcie		Drugie przycięcie	
	min	max	min	max
Sila docisku/Blankholder force [kN]	200			
Sila ograniczająca/Restraining force [kN/mm]	0,295333			
Sila otwarcia/Opening force [kN/mm]	0,207761			
Grubość/Thickness [mm]	min	0,399074	0,399068	
	max	0,495273	0,495273	
Odkształcenia plastyczne/Plastic strain	min	0,019416	0,019416	
	max	0,336133	0,336133	
Odległość między wytlóćzką nominalną a wytlóćzką po tłoćczeniu/Distance between object[numerical] [mm]	min	0,006253	0,000153	
	max	0,551890	0,101669	
Naprężenia zredukowane w ostatnim etapie tłoćczenia/Equivalent stress - Membrane [GPa]	min	0,193688	0,000681	
	max	0,623457	0,250611	
Naprężenia zredukowane po sprężynowaniu/Equivalent stress - Membrane[GPa]	min	0,000681	0,000515	
	max	0,250611	0,250929	



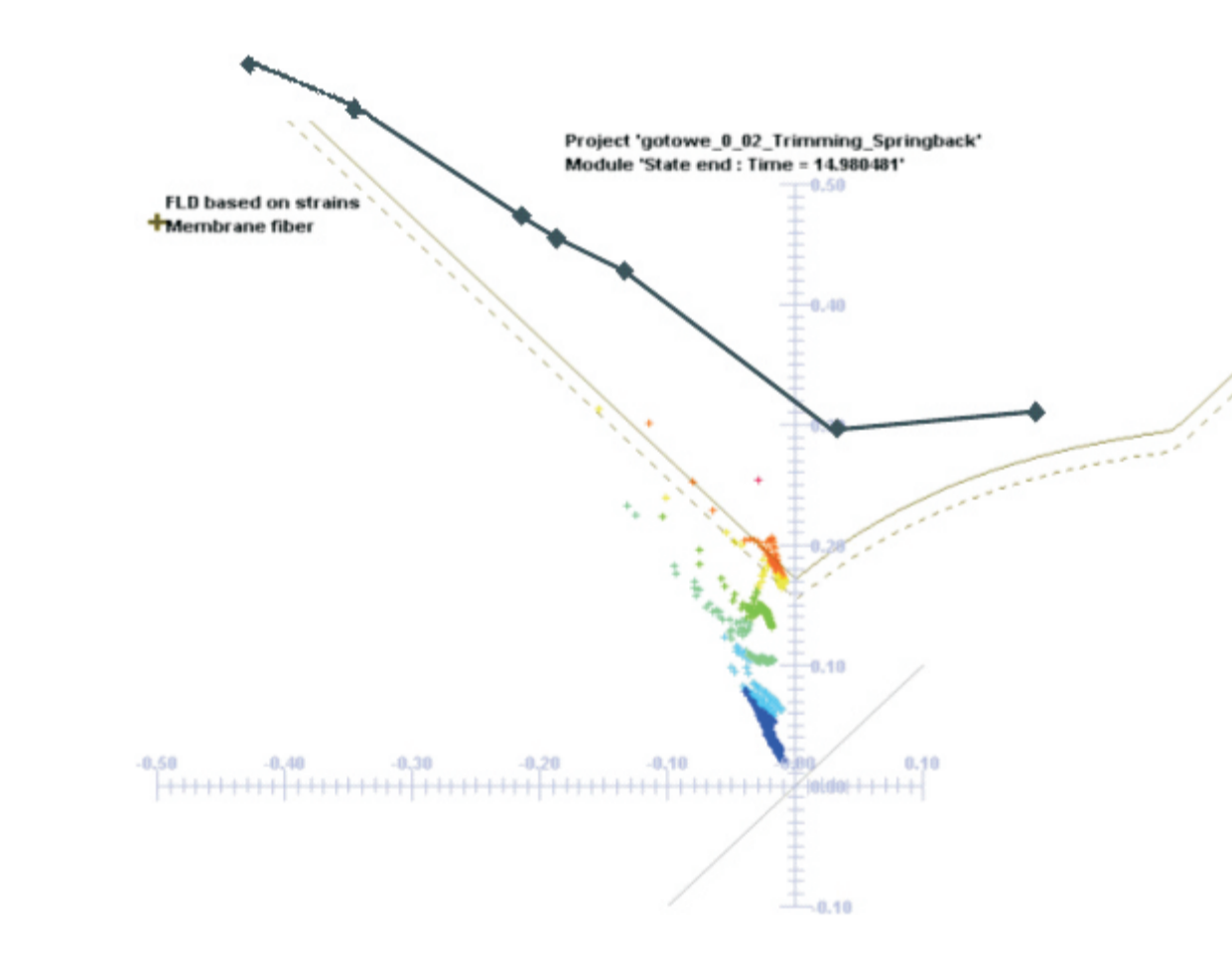
Rys. 2. Wytlóćczka po drugim przycięciu z zaznaczeniem płaszczyzny przekroju



Rys. 3. Rozkład grubości [mm] wzdłuż płaszczyzny przekroju



Rys. 4. Odległość między wytlóćzką nominalną, a wytlóćzką po przycinaniu [mm]



Rys. 5. Odkształcenia główne po procesie tłoćczenia

Wnioski

Przeprowadzona analiza numeryczna wskazuje, że istnieje możliwość opracowania procesu tłoćczenia owiewki wg przyjętych założeń z blachy Gr 2. Stwierdzono że:

- grubość wytlóćczki po tłoćczeniu nie przekracza założonej tolerancji,
- odchyłki wytlóćczki po tłoćczeniu w stosunku do wymiaru nominalnego nie przekraczają założonej tolerancji,
- odkształcenia główne mimo, iż przewyższają wartość graniczną odkształceń, wyznaczoną teoretycznie, to nie przekraczają KOG określonej doświadczalnie.

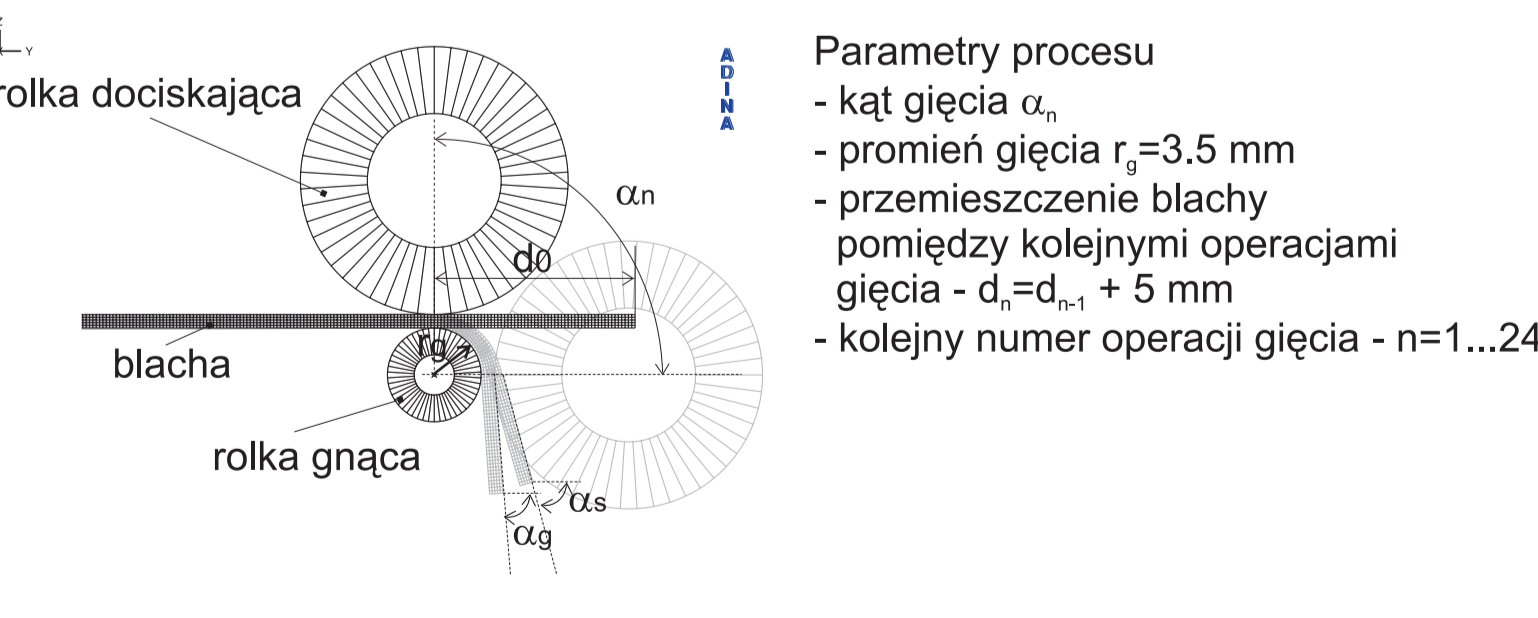
Wyniki badań

Modelowanie numeryczne procesu gięcia owiewki tytanowej na rolkach

Celem prowadzonych badań była analiza numeryczna procesu gięcia na rolkach owiewki wykonanej z pasa blachy z technicznie czystego tytanu Gr 2 oraz blachy ze stopu tytanu Gr 5 (Ti6Al4V) o grubości 1 mm i szerokości 20 mm. Geometrię modelu MES przedstawiono na rys. 1. Płaski (2D) model procesu składa się z 2901 kwadratowych 9-węzłowych elementów typu 2D-solid i 13012 węzłów. Obliczenia prowadzono przy użyciu programu ADINA v. 8.6. Do obliczeń zastosowano idealnie sztywne model materiału w odniesieniu do elementów narzędzia giącego oraz izotropowy, sprężysto-plastyczny model materiału w odniesieniu do giętej blachy. Przyjęte do obliczeń dane materiałowe zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Właściwości materiałowe użyte do obliczeń

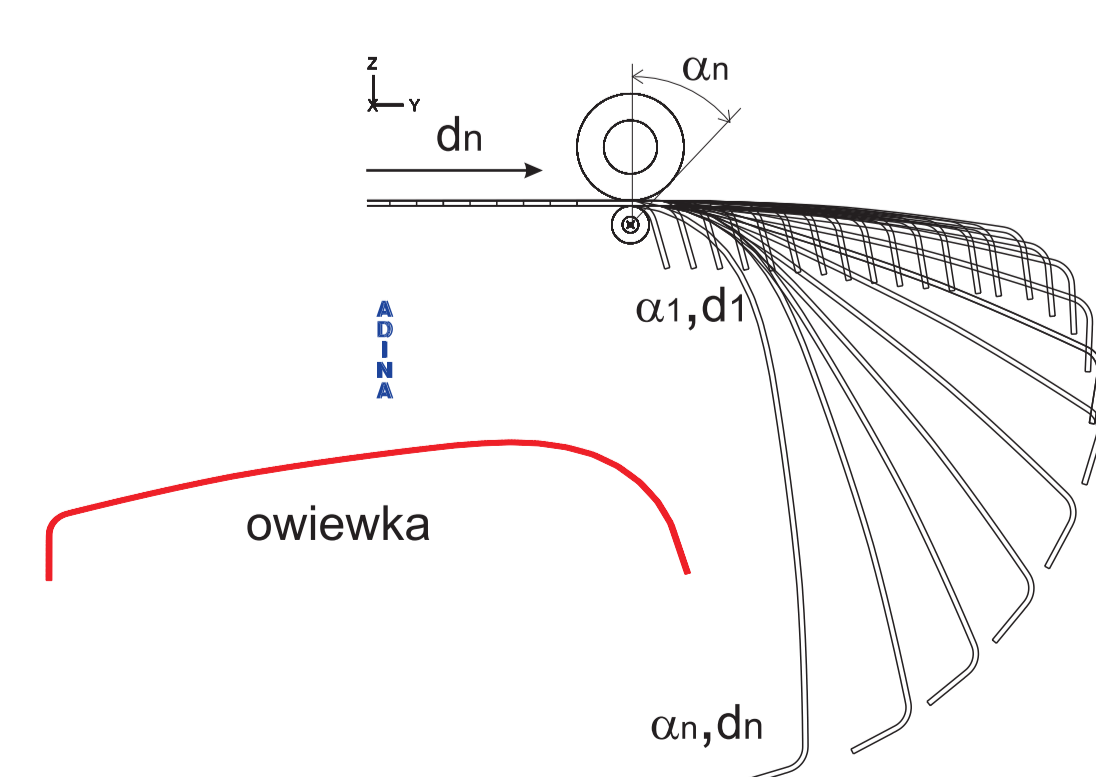
Materiał	GRADE 2	GRADE 5	
Wytrzymałość na rozciąganie Rm [MPa]	522	1048	
Wytrzymałość na ścinanie Rm [MPa]	368	999	
Moduł Younga E [GPa]	110	110	
współczynnik Poissona ν	0,37	0,37	
$\sigma_y = K \epsilon^n$	K	822	1338
	n	0,18	0,05



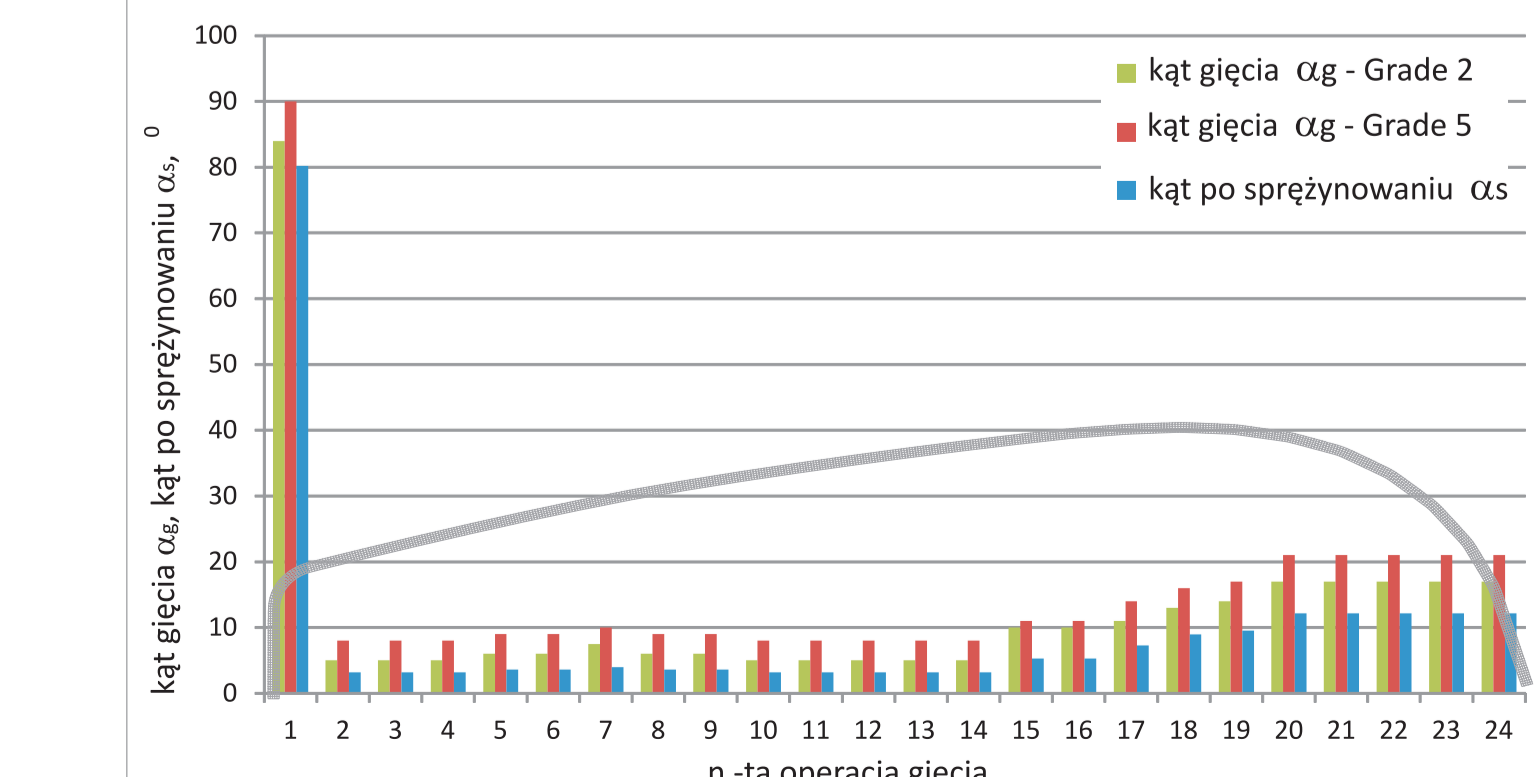
Rys. 1. Model numeryczny procesu gięcia na rolkach

Wyniki obliczeń numerycznych

W toku przeprowadzonych symulacji określono wartości kątów gięcia α , oraz kątów po zdjęciu obciążenia α_0 , w kolejnych etapach procesu kształtowania owiewki tytanowej (rys. 2 i 3).

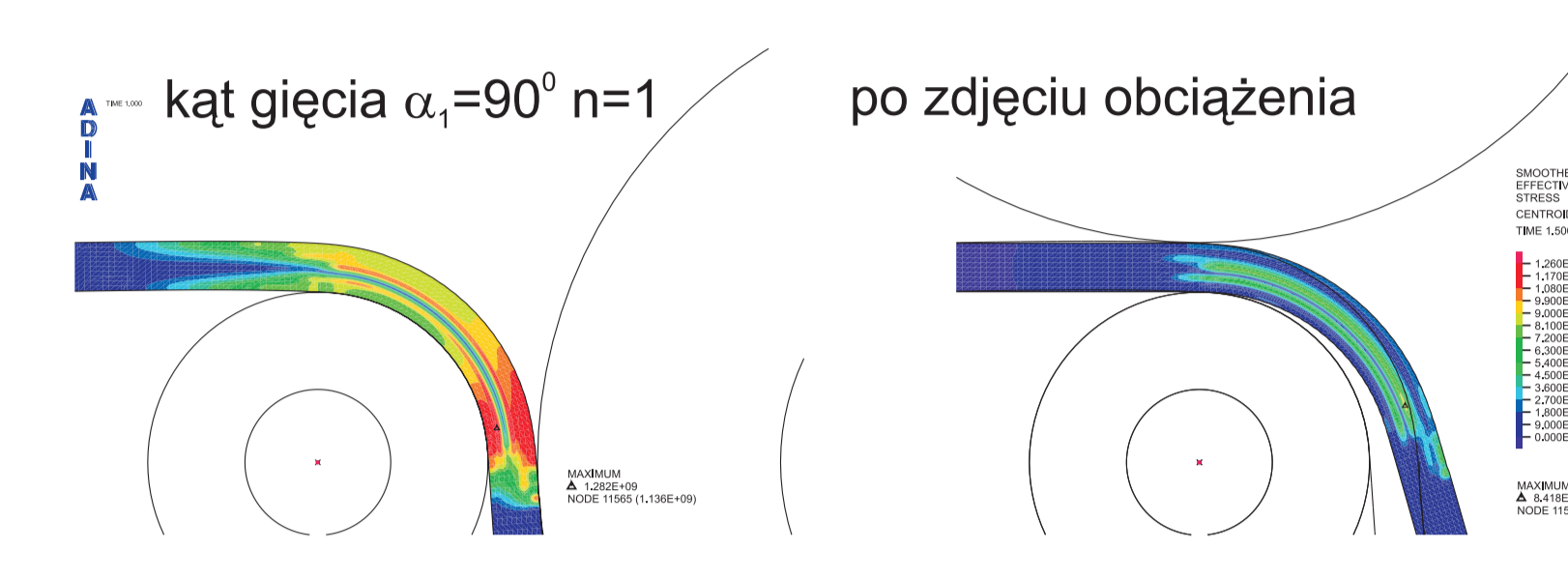


Rys. 2. Symulacja procesu gięcia na rolkach owiewki

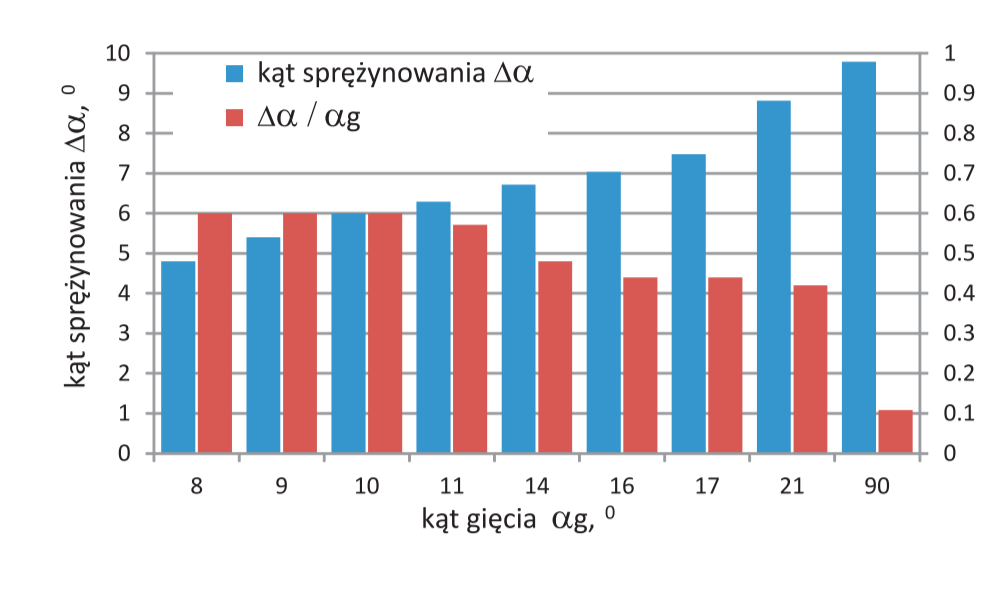


Rys. 3. Wartości kątów gięcia w procesie kształtowania owiewki

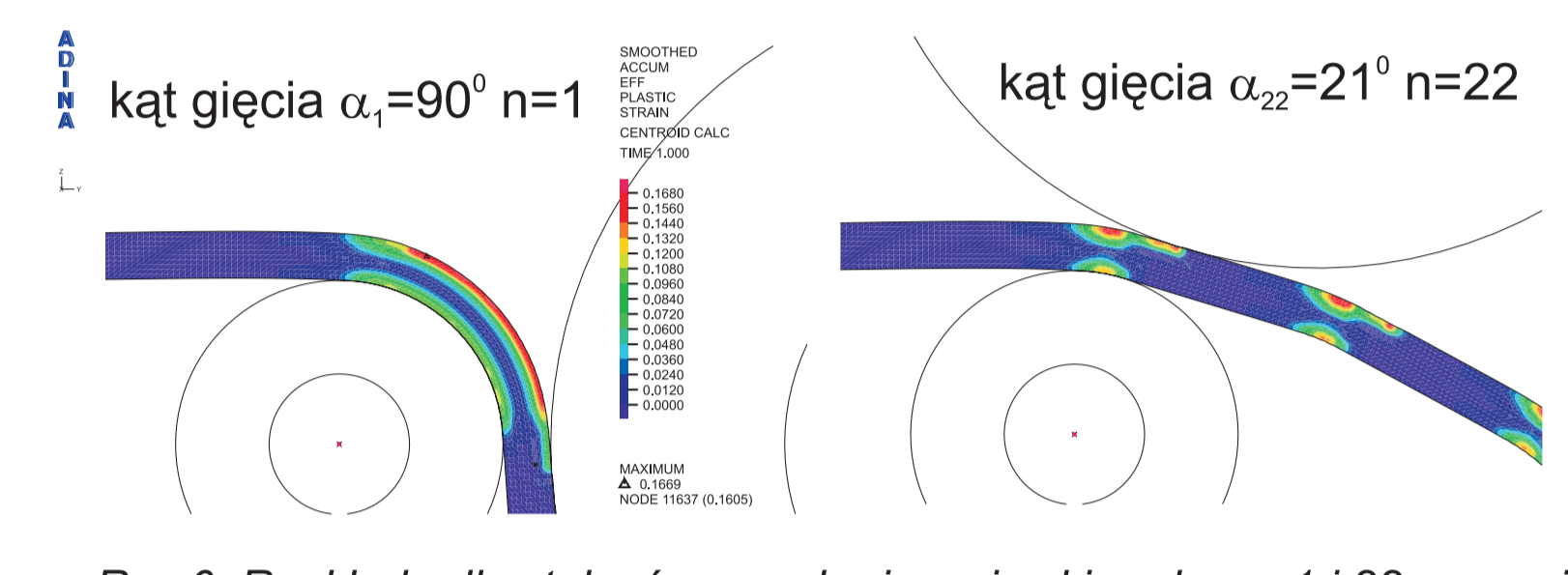
Przykładowe wyniki obliczeń oraz rozkłady odkształceń i naprężeń w przekroju kształtowanej owiewki w kolejnych operacjach gięcia ilustrują rysunki 4-7.



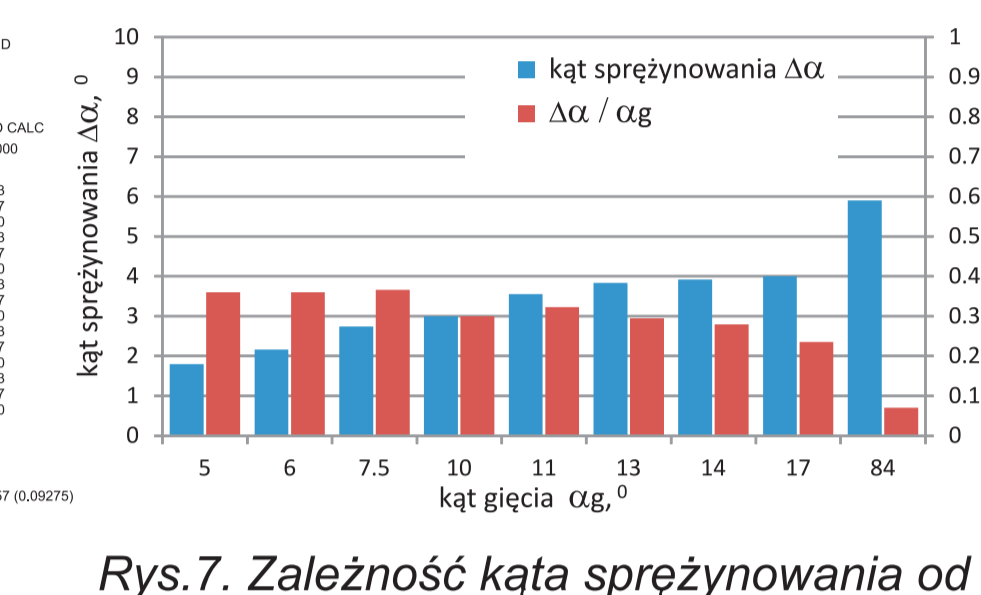
Rys. 4. Rozkład naprężeń w przekroju owiewki podczas operacji gięcia



Rys. 5. Zależność kąta sprężynowania od kąta gięcia w operacjach gięcia owiewki z blachy GRADE 5



Rys. 6. Rozkład odkształceń w przekroju owiewki podczas 1 i 22 operacji gięcia (materiał: Grade 5)



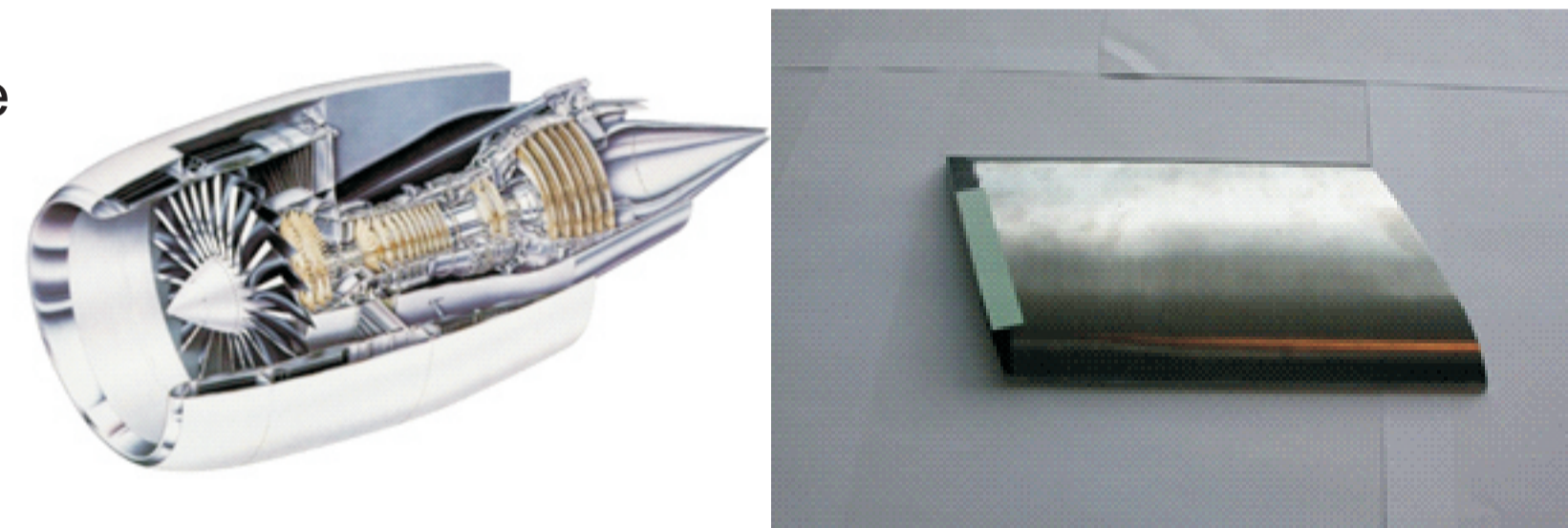
Rys. 7. Zależność kąta sprężynowania od kąta gięcia w operacjach gięcia owiewki z blachy GRADE 2

Wnioski

Przeprowadzone obliczenia numeryczne potwierdziły możliwość kształtowania owiewki z blach tytanowych Gr 2 oraz Gr 5 w procesie gięcia na rolkach. W wyniku przeprowadzonych symulacji wyznaczono parametry procesu gięcia (kąta gięcia, liczba faz gięcia, przemieszczenie materiału), pozwalające uzyskać żądany kształt owiewki. Istotnym problemem występującym podczas operacji gięcia blach tytanowych, który należy uwzględnić podczas projektowania procesu, jest zjawisko powrotnego odkształcenia materiału po zdjęciu obciążenia. Jak wykazały badania numeryczne, intensywność sprężynowania materiału jest uzależniona od zakresu i wartości odkształceń plastycznych w kształtowanych przekroju, które z kolei są zależne od parametrów procesu oraz rodzaju giętego materiału. Wraz ze wzrostem kąta gięcia oraz własności wytrzymałościowych giętej blachy wzrasta wartość kąta sprężynowania, wzrasta również wartość naprężeń własnych pozostających w kształtowanym wyrobie.

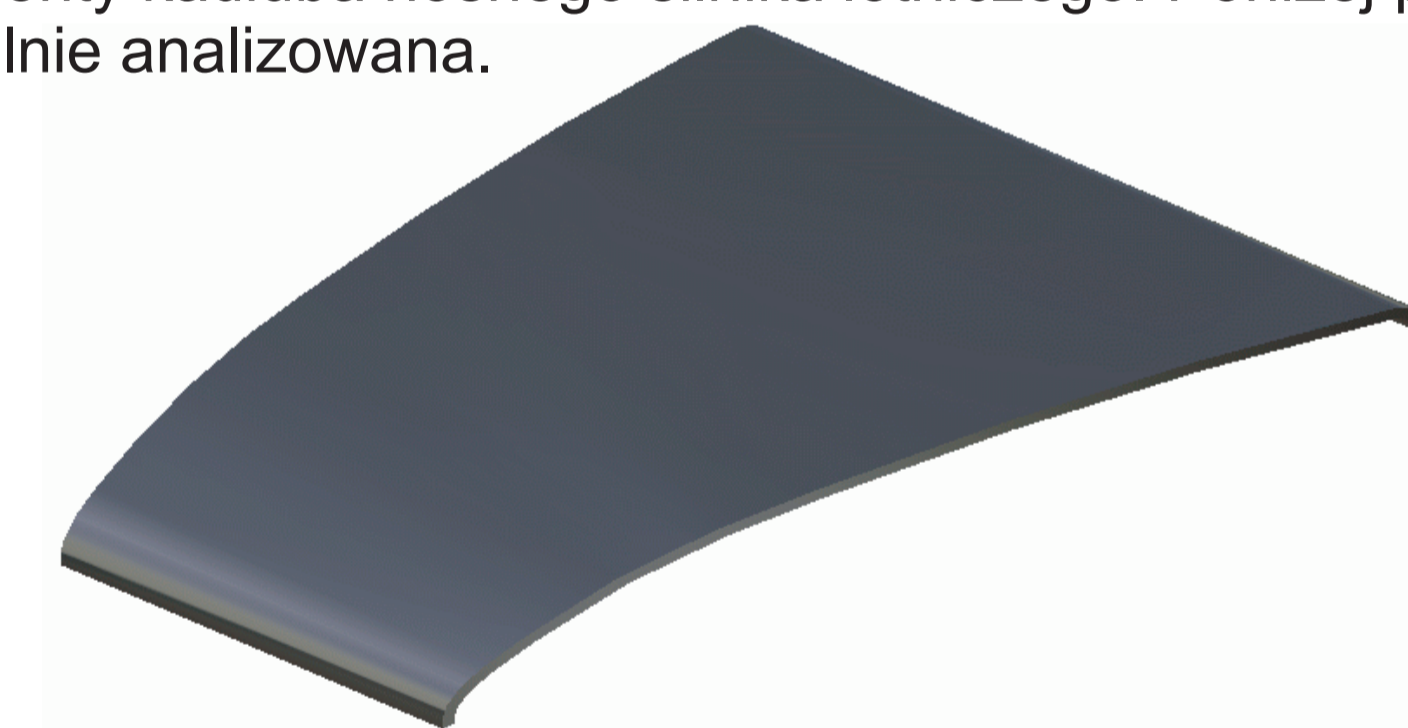
Przykłady zastosowania w lotnictwie

Owiewki są elementami silnika lotniczego i na ogół wykonuje się je z trudno odkształcalnych materiałów takich jak np. AK Steel 17-4 PH. W ramach projektu realizowane są badania nad stosowaniem lżejszych materiałów możliwych do zastosowania na owiewki lotnicze.



Przykłady współpracy z przemysłem lotniczym

W zakresie realizowanych badań zespół P.Cz. współpracuje z WSK Rzeszów. Prowadzone badania dotyczą opracowania technologii tłoćczenia na zimno części ze stopów Ti stosowanych na elementy kadłuba nośnego silnika lotniczego. Poniżej pokazano przykładową część która jest aktualnie analizowana.



Przykład analizowanej owiewki lotniczej

Prace koncentrują się na modelowaniu numerycznym procesu tłoćczenia pokazanej części. W symulacji numerycznej analizie poddaje się siłę docisku, warunki tarcia, rodzaj materiału itp.

Wskaźniki realizacji celów projektu

Referaty

- Lacki P.: **Analiza numeryczna procesu wyciskania przeciwbieżnego z udziałem tarcia aktywnego**. Wyd.: Conference proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference "Design and technology of Drawpieces and die Stampings", 09-11.06.2010 Poznań-Wąsowo, str. 123-132
- Malinowicz A., Adamus J.: **Analiza właściwości sprężystych blachy tytanowej Ti6Al4V**. Wyd.: conference proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference "Design and technology of Drawpieces and die Stampings", 09-11.06.2010 Poznań-Wąsowo, str. 179-181
- Więdkowski W., Lacki P., Adamus J.: **Modelling of Fine Blanking Process of Aluminium Sheets**. Wyd.: Conference proceedings of the 20th International Workshop on Computational Mechanics of Materials - IWCMM 20, 8-10 września 2010, Loughborough, UK, Book of Abstracts. str. 96-97

Publikacje

- Adamus J., Lacki P., Motyka M., Nitkiewicz Z.: **Analysis of titanium sheet bending process**. Inżynieria Materiałowa, Nr 3 (175), R. XXXI, str. 716-719
- Lacki P.: **Analiza numeryczna procesu wyciskania przeciwbieżnego z udziałem tarcia**. Obróbka Plastyczna Metali, tom XXI, Nr 2, 2010, str. 119-128
- Adamus J., Lacki P.: **Forming of the titanium elements by bending**. Wyd.: Computational Materials Science, 2010, (w druku)

Prace mgr, dr, hab.

- Prace magisterskie obronione:**
 - Robert Wilczarski: **Tytan i jego stopy w przemyśle lotniczym**. Promotor: dr inż. Adamus Janina
 - Radosław Podlewski: **Aluminium i jego stopy w przemyśle lotniczym**. Promotor: dr inż. Adamus Janina
 - Krzysztof Wróć: **Aluminium i tytan jako materiały alternatywne dla stali – zastosowania lotnicze**. Promotor: dr inż. Adamus Janina
 - Tomasz Nikisz: **Zastosowanie krzywych odkształceń granicznych do oceny właściwości plastycznych blach**. Promotor: dr inż. Adamus Janina
 - Jacek Kubicki: **Komputerowe wspomaganie procesu tłoćczenia wytlóćczki osiowo-symetrycznej**. Promotor: dr inż. Lacki Piotr

Prace habilitacyjne

- Tytuł: **Analiza kształtowania wyrobów tytanowych metodami obróbki plastycznej na zimno**
Autor: Adamus Janina
Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2010, seria Monografie Nr 174
Przewidywany termin obrony: styczeń/luty 2011 r.

- Tytuł: **Modelowanie tarcia w procesach objętościowej obróbki plastycznej**
Autor: Lacki Piotr
Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2010, seria Monografie Nr 169
Termin obrony: 09.12.2010 r.