

Dr inż. Janina ADAMUS

Politechnika Częstochowska, Instytut Obróbki Plastycznej, Inżynierii Jakości i Bioinżynierii, Częstochowa

Wybrane problemy kształtowania blach tytanowych

Some problems with forming of the titanium sheets

Streszczenie

W artykule omówiono wybrane problemy kształtowania blach tytanowych. Podano wyniki symulacji numerycznej procesu tłoczenia, ze szczególnym zwróceniem uwagi na wpływ tarcia, geometrii narzędzi i siły docisku na przebieg procesu tłoczenia. Dane materiałowe i technologiczne blach wyznaczono doświadczalnie. Obliczenia numeryczne porównano z eksperymentem. Symulację numeryczną przeprowadzono w oparciu o program ADINA v. 8.3, oparty na Metodzie Elementów Skończonych.

Abstract

In the paper some problems with stamping of the titanium sheets have been discussed. The numerical simulation results of the stamping process have been shown. A special attention has been paid to the influence of friction, tool geometry and holding down force on the course of stamping process. Both material and technological data had been determined experimentally. The calculation results have been compared with the test ones. The numerical simulations have been carried out with the ADINA System v. 8.3, based on the Finite Element Method.

Słowa kluczowe: blacha tytanowa, tłoczenie, smarowanie, symulacja numeryczna

Key words: titanium sheet, stamping, lubrication, numerical simulation

1. WPROWADZENIE

Obróbka plastyczna metali ma znaczący udział w nowoczesnych technikach wytwarzania, gdyż pozwala na produkowanie wysokiej jakości wyrobów o złożonych kształtach przy niskich kosztach wytwarzania. Duży udział w obróbce plastycznej metali stanowią procesy tłoczenia blach, które umożliwiają produkcję szerokiej gamy elementów metalowych, poczynając od przemysłu motoryzacyjnego i lotniczego poprzez sprzęt gospodarstwa domowego i drobną galanterię metalową, a ostatnio również dla potrzeb inżynierii biomedycznej.

Typowym materiałem stosowanym w tłocznictwie są blachy stalowe, ale z każdym rokiem rozszerza się zakres stosowanych materiałów, m.in. o takie metale jak: stopy aluminium czy tytanu. Niestety wiąże się to z koniecznością rozwiązywania nowych problemów technologicznych. Na szczególną uwagę

zasługują materiały tytanowe, charakteryzujące się dużą lekkością (gęstość stopów tytanu waha się w granicach $4,43 \div 4,85 \text{ g/cm}^3$) i wysoką wytrzymałością mechaniczną (od $R_m \approx 290 \text{ MPa}$ dla technicznie czystego tytanu Grade 1 do około 1750 MPa dla obrabianych cieplnie stopów tytanu β) [4]. Połączenie wysokiej wytrzymałości mechanicznej i małej gęstości sprawia, że stopy tytanu przewyższają pod tym względem niemal wszystkie metale, znajdując zastosowanie tam, gdzie ciężar i wytrzymałość konstrukcji mają istotne znaczenie (przemysł lotniczy i kosmiczny, sprzęt sportowy, medycyna). Ponadto stopy tytanu mają o połowę mniejszy moduł Young'a aniżeli stal, co czyni je doskonałym materiałem na sprężyny [15, 7, 11].

Ważną cechą charakterystyczną tytanu jest dobra odporność na korozję. Dzięki naturalnej, cienkiej ($3 \div 7 \text{ nm}$), ale trwałej, ochronnej warstewce tlenków (głównie TiO_2) tytan jest

odporny na działanie czynników atmosferycznych, wody morskiej i wielu chemikaliów [3, 13, 14]. Ze względu na całkowitą neutralność w organizmie człowieka znalazł zastosowanie w chirurgii w postaci różnego rodzaju implantów (endoprotezy stawu biodrowego i kolanowego, implanty kręgosłupa, implanty zębowe itp.) oraz do produkcji biżuterii i zegarków.

Produkcja wyrobów ze stopów tytanu napotyka jednak na duże trudności, głównie ze względu na dużą skłonność tego metalu do łączenia się z tlenem, azotem i wodorem, które powodują zwiększenie twardości osnowy metalicznej, a w niektórych przypadkach prowadzą do kruchego pęknięcia [12]. W celu uniknięcia dyfuzji tych gazów do tytanu wszystkie procesy w podwyższonych temperaturach muszą być prowadzone z zastosowaniem atmosfer ochronnych lub próżni.

Największy minus, jeśli chodzi o powszechne stosowanie tytanu, stanowi jego cena. Wysoki koszt wytwarzania i to, że przez wiele lat tytan był traktowany wyłącznie jako materiał strategiczny, spowodowały, że istnieje niewiele publikacji z zakresu kształtowania tytanu metodami obróbki plastycznej, zwłaszcza obróbki plastycznej na zimno - tłoczenia.

2. TYTAN I JEGO STOPY JAKO MATERIAŁ STOSOWANY NA WYTŁOCZKI

Tytanowe elementy tłoczone to głównie wytłoczki z czystego tytanu technicznego, zwłaszcza Grade 1 i 2, co wynika z dobrej tłoczności w temperaturze otoczenia. Ze względu na niskie właściwości mechaniczne wytłoczki z czystego tytanu wykorzystywane są przede wszystkim na obudowy notebooków i telefonów komórkowych, koperty zegarków itp. Dwufazowe stopy tytanu $\alpha+\beta$, takie jak stop Ti6Al4V, charakteryzują się lepszymi właściwościami mechanicznymi, ale niestety gorszą zdolnością do odkształceń plastycznych w temperaturze otoczenia, co uniemożliwia kształtowanie metodą tradycyjnego tłoczenia tj. za pomocą sztywnych narzędzi stempla i matrycy. Bardzo mała tłoczność stopów tytanu ogranicza ich zastosowanie głównie do elementów wykrawanych i ewentualnie dotłaczanych.

2.1. Tytan techniczny

Właściwości mechaniczne tytanu zależą od jego czystości, która jest pochodną sposobu otrzymywania i przerobu tytanu. Zwiększenie ilości zanieczyszczeń prowadzi do podwyższenia twardości i właściwości wytrzymałościowych oraz obniżenia właściwości plastycznych.

Technicznie czysty tytan produkowany jest w 5 gatunkach. Według ASTM B265 są to Grades 1÷4 i 7. Każdy gatunek zawiera inny stopień zanieczyszczenia od 0,2 do 1,2%. Najczęstszymi zanieczyszczeniami są: tlen, azot, węgiel, żelazo, wodór i krzem. Najczystszy jest tytan Grade 1. Granica plastyczności zmienia się ze 170 MPa dla Grade 1 do 480 MPa dla Grade 4, a granica wytrzymałości na rozciąganie odpowiednio z 290 do 740 MPa. Zróżnicowanie właściwości mechanicznych osiągnięte jest głównie poprzez zróżnicowanie zawartości tlenu i żelaza. Ze wzrostem ich zawartości rośnie wytrzymałość na rozciąganie i twardość. Dodatki stopowe mogą zwiększyć wytrzymałość na rozciąganie do ponad 1200 MPa [5, 8, 10, 12].

Czysty tytan techniczny, w skali przemysłowej, produkowany jest w postaci odlewów, blach, prętów i rur. Może być obrabiany plastycznie na zimno, bądź w podwyższonej temperaturze do około 500°C oraz obróbką skrawaniem. Czysty technicznie tytan nie podlega obróbce cieplnej i umacnia się wyłącznie w wyniku obróbki plastycznej na zimno, której skutki można usunąć poprzez wyżarzanie rekrytalizujące w zakresie temperatur 600-700°C. Blachy z czystego technicznie tytanu, zwłaszcza Grade 1 i Grade 2 dość dobrze kształtują się w temperaturze otoczenia przy zastosowaniu technik i tłoczników stosowanych do kształtowania blach stalowych.

2.2. Stopy tytanu

Tytan może występować w dwóch sieciach krystalicznych: jako gęsto upakowana heksagonalna sieć przestrzenna (Ti α) i regularna sieć krystaliczna centrowana przestrzennie (Ti β). Faza α jest stabilna do temperatury 882°C, w której przechodzi w fazę β lub odwrotnie. Faza β jest stabilna od temperatury 882°C do temperatury topnienia tj. 1668°C.

Pierwiastki stopowe mają wpływ na temperaturę przemiany fazy α w β . Aluminium, tlen, azot i węgiel stabilizują fazę α , podczas gdy wanad, molibden, niob, chrom, mangan, żelazo, wodór stabilizują fazę β .

Stopy tytanu w zależności od struktury występującej w temperaturze pokojowej dzieli się na stopy: jednofazowe α , dwufazowe $\alpha+\beta$ i jednofazowe β . Każdą grupę stopów cechują inne właściwości mechaniczne i technologiczne, decydujące o ich zastosowaniu. Blachy z dwufazowych stopów tytanu cechują się wysokimi właściwościami mechanicznymi, ale równocześnie mają bardzo niską zdolność do odkształceń plastycznych w temperaturze otoczenia. Ich tłoczność można zwiększyć poprzez kształtowanie w podwyższonej temperaturze (powyżej 500°C), ale wiąże się to z koniecznością rozwiązania problemu wysokiej podatności tytanu do pochłaniania tlenu, azotu i wodoru, powodujących zmiany strukturalne i zmiany właściwości wytrzymałościowych.

3. CEL I ZAKRES BADAŃ

Do badań wytypowano dwa gatunki blach tytanowych: czysty tytan techniczny (Grade 2) i stop tytanu Ti6Al4V, których skład chemiczny podano w tabelicy 1. Powyższy wybór był podyktowany tym, iż są to materiały tytanowe najczęściej stosowane w technice i medycynie.

W ramach badań doświadczalnych wyznaczono:

- właściwości mechaniczne i technologiczne analizowanych blach tytanowych w statycznej próbie rozciągania,
- współczynnik tarcia dla różnych par trących w obecności smarów technologicznych i w warunkach tarcia technicznie suchego w tzw. „próbie przeciągania pasa blachy”.

Ponadto przeprowadzono symulację numeryczną procesu tłoczenia przy użyciu programu ADINA v. 8.3 [2], a wyniki obliczeń porównano z wynikami badań doświadczalnych.

Tablica 1. Skład chemiczny blachy tytanowej Grade 2 [16] i Ti6Al4V [17]

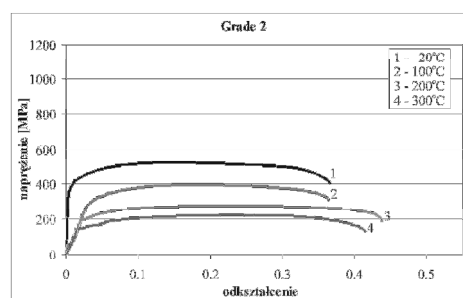
Table 1. Chemical composition of the titanium sheets Grade 2 [16] and Ti6Al4V [17]

Materiał	Zawartość % pierwiastka				
	Al	V	C	Fe	Y
Grade 2	-	-	0,014	0,08	-
Grade 5	6,3	4,1	0,003	0,2	<0,006
	O	N	H	Ti	
Grade 2	0,11	0,005	22/32 ppm	reszta	
Grade 5	0,02	0,006	0,001	reszta	

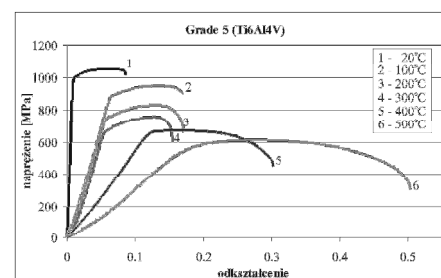
4. WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

W związku z niską tłocznością blach tytanowych, zwłaszcza blach ze stopów tytanu, badania właściwości mechanicznych przeprowadzono zarówno w temperaturze otoczenia, jak i w podwyższonej temperaturze tj. w temp. 100, 200 i 300°C, a dla stopu tytanu Ti6Al4V dodatkowo w temp. 400 i 500°C. Badania wykazały, że ze wzrostem temperatury występuje obniżenie parametrów mechanicznych (R_e i R_m), przy jednoczesnym wzroście wydłużenia A materiału próbek. Wyniki badań ilustruje rysunek 1. W tabelicy 2 zestawiono wyniki badań właściwości mechanicznych badanych blach.

a)



b)



Rys. 1. Zależność naprężenie – odkształcenie: a) Grade 2, b) Ti6Al4V

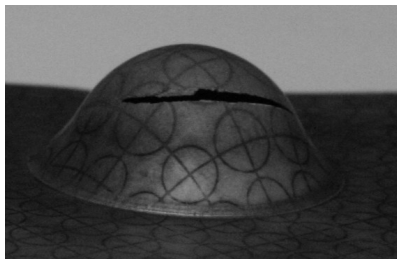
Fig. 1. Stress – strain dependence: a) Grade 2, b) Ti6Al4V

Tablica 2. Właściwości mechaniczne badanych blach
 Table 2. Mechanical properties of the tested sheets

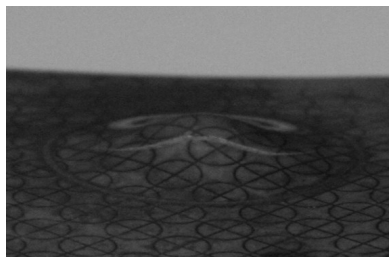
Lp.	Materiał	Kierunek pobrania próbki	Temp [°C]	Re _{0,2} [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	$\sigma = C\varphi^n$
1.	CP2	0°	20	368	522	37	$\sigma = 822\varphi^{0,18}$
2.		45°	20	399	486	36	$\sigma = 711\varphi^{0,15}$
3.		90°	20	424	496	14	$\sigma = 726\varphi^{0,13}$
4.	Ti6Al4V	0°	20	999	1048	9	$\sigma = 1338\varphi^{0,05}$
5.		45°	20	994	999	3	$\sigma = 1196\varphi^{0,04}$
6.		90°	20	1035	1049	9	$\sigma = 1234\varphi^{0,04}$

Ponadto z próby tłoczności metodą Swifta [18] określono graniczny współczynnik tłoczenia, który dla blachy tytanowej Grade 2 wynosi $m_{gr} = 2,34$ oraz współczynnik anizotropii normalnej $R = 4,5$. Badań takich nie przeprowadzono dla blachy ze stopu tytanu Ti6Al4V ze względu na bardzo małą tłoczność w temperaturze otoczenia, na co wskazują wyniki próby tłoczności Erichsena (rys. 2) – głębokość wytłoczenia do momentu pęknięcia dla blachy tytanowej Grade 2 wynosi 12 mm, podczas gdy dla blachy ze stopu tytanu Ti6Al4V wynosi zaledwie 3 mm.

a)



b)

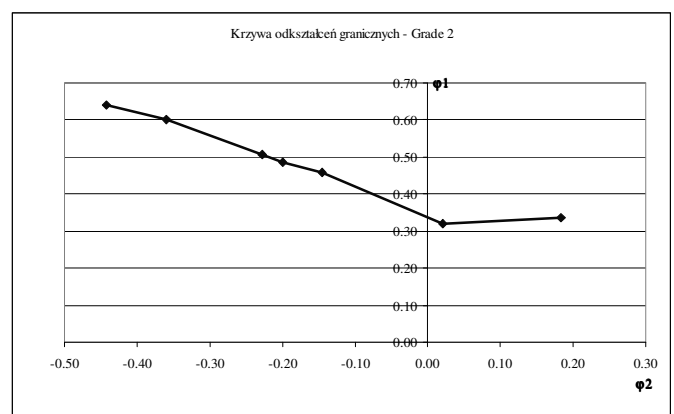


Rys. 2. Widok próbek po próbie tłoczności metodą Erichsena: a) Grade 2, b) Ti6Al4V

Fig. 2. A view of the samples after Erichsen test: a) Grade 2, b) Ti6Al4V

W ramach badań doświadczalnych wyznaczono również krzywą odkształceń granicznych

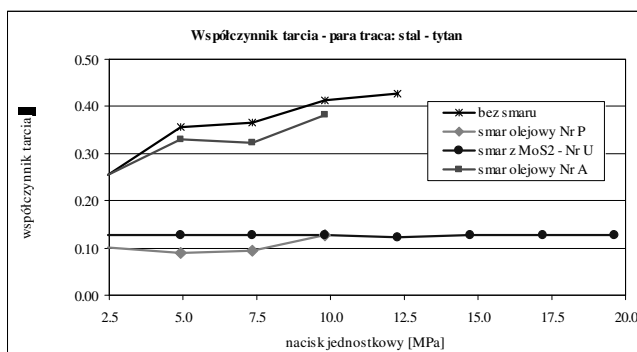
dla blachy z tytanu Grade 2 (rys. 3), zgodnie z metodyką opisaną w [1], która umożliwia ocenę przydatności blachy do operacji tłoczenia już na etapie projektowania procesu technologicznego. Z wykresu wynika, że odkształcenie w najniższym punkcie krzywej wynosi $\varphi_1 = 0,32$ i jest znacznie mniejsze w porównaniu do stali, co oznacza, że w temperaturze otoczenia z tej blachy można kształtować raczej niezbyt głębokie i skomplikowane wytłoczki.



Rys. 3. Krzywa odkształceń granicznych dla blachy tytanowej Grade 2

Fig 3. Forming limit diagram for Grade 2 sheet

Oprócz wyznaczonych doświadczalnie właściwości mechanicznych do przeprowadzenia symulacji numerycznej niezbędne jest określenie współczynnika tarcia na styku: „stempel – obrabiany materiał – matryca”. Współczynnik tarcia wyznaczono w próbie przeciągania pasa blachy tytanowej pomiędzy płaskimi szczękami wykonanymi ze stali NC6. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Współczynnik tarcia dla pary trącej: „stal – tytan”

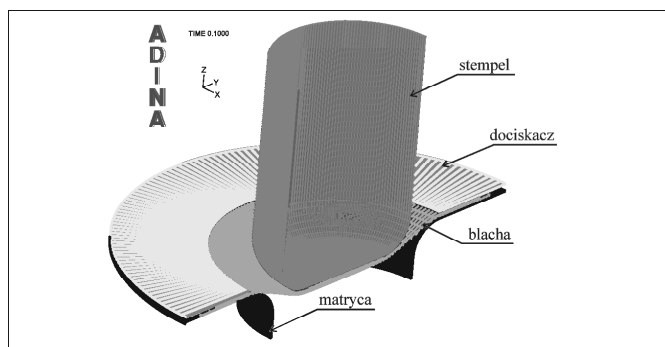
Fig. 4. Friction coefficient for the frictional pair: „steel-titanium”

Przeciąganie pasów blachy tytanowej przeprowadzono bez smarowania (w warunkach tarcia technicznie suchego) oraz przy zastosowaniu następujących smarów technologicznych: handlowych smarów olejowych oznaczonych literami A i P oraz smaru olejowego z dodatkiem MoS₂ oznaczonego literą U. Jak widać z rysunku 4 w przypadku pary trącej: „stal – tytan” typowe smary olejowe (np. smar olejowy Nr A), stosowane do tłoczenia blach stalowych nie nadają się do tłoczenia blach tytanowych. Największe obniżenie współczynnika tarcia uzyskano po zastosowaniu smarów z dodatkiem grafitu lub dwusiarczku molibdeny (np. smar „U”), powodującego obniżenie współczynnika tarcia z $\mu = 0,3$ dla tarcia technicznie suchego do wartości $\mu = 0,127$. Należy również zwrócić uwagę na dodatkową rolę, jaką spełnia smar technologiczny w procesie tłoczenia blach tytanowych, a mianowicie zapobiega tworzeniu się tytanowych narostów na narzędziach. Tytan charakteryzuje się szczególną skłonnością do nalepiania się na narzędziach, co uniemożliwia otrzymywanie wyłoczek o gładkiej powierzchni zewnętrznej.

5. WYNIKI ANALIZ NUMERYCZNYCH

Analizę procesu tłoczenia przeprowadzono dla wyłoczki osiowo symetrycznej, cylindrycznej. Analizowano wpływ tarcia, siły docisku i geometrii narzędzi na wielkość pocienienia ścianek wyłoczek i rozkład odkształceń. Przykładowe wyniki obliczeń numerycznych przedstawiono na rysunkach 5–9. Rysunek 5

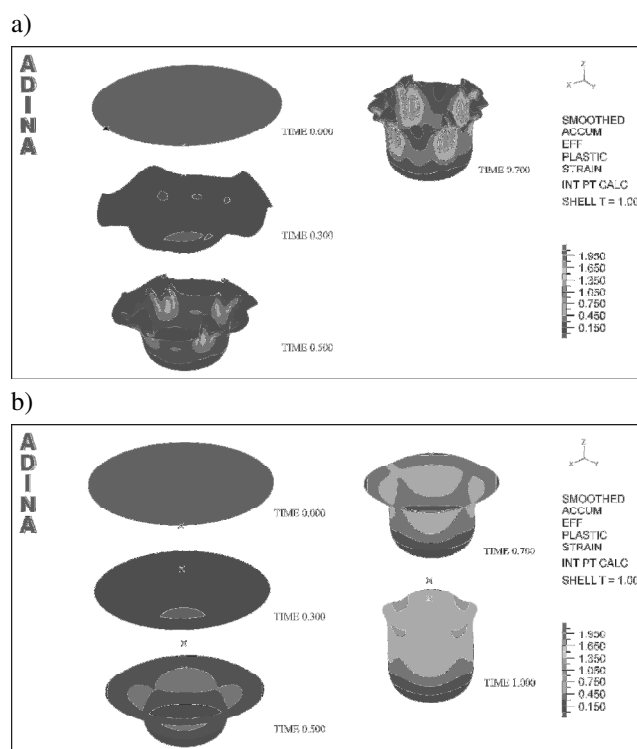
w sposób schematyczny pokazuje model numeryczny procesu tłoczenia.



Rys. 5. Model numeryczny procesu tłoczenia wyłoczki cylindrycznej

Fig. 5. Numerical model of the stamping process for the cylindrical cup

Na rysunku 6 pokazano wpływ siły docisku na przebieg procesu tłoczenia w kolejnych etapach kształtowania, tj. dla kroku czasowego $t = 0,0, 0,3, 0,5, 0,7$ i $1,0$ s.

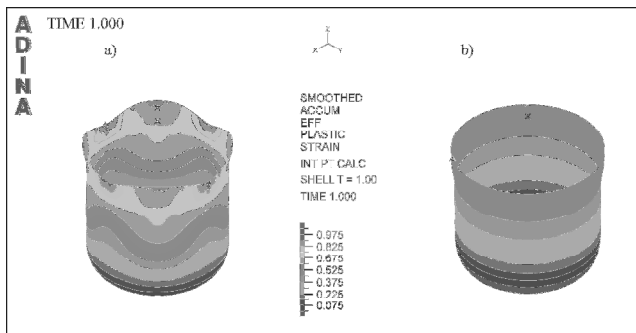


Rys. 6. Wpływ siły docisku na przebieg procesu tłoczenia: a) bez dociskacza, b) z dociskaczem

Fig. 6. An influence of the holding down force on the course of the stamping process: a) with a blankholder, b) with no blankholder

Na rysunku 6a pokazano wyniki symulacji numerycznej dla przypadku tłoczenia ze zbyt małą siłą docisku, a na rysunku 6b wyniki po

odpowiednim zmodyfikowaniu siły docisku. Brak siły docisku lub zbyt mała jej wartość prowadzą do fałdowania blachy w części kołnierzej wyłoczki, gdzie dominują obwodowe naprężenia ściskające. Jak widać z rysunku pofałdowanie powstaje już w początkowym etapie kształtowania i zwiększa się w miarę postępującego odkształcenia. Dla $t = 0.7$ na skutek nadmiernego pofałdowania kołnierza i towarzyszącego mu znacznego pogrubienia w części kołnierzej i pocienienia w części dennej wyłoczki, opory kształtowania przekraczają dopuszczalną wartość odkształceń materiału, w wyniku czego w rzeczywistości nastąpiłoby pęknięcie wyłoczki. Siła docisku zapobiega fałdowaniu kołnierzej części wyłoczki, dzięki czemu uzyskuje się prawidłowo ukształtowaną wyłoczkę. Właściwy dobór siły docisku jest szczególnie istotny w przypadku kształtowania wyłoczek z blach walcowanych na zimno, cechujących się anizotropią płaską właściwości plastycznych, która wynika z uprzywilejowanej orientacji ziaren. Rys. 7 ilustruje wpływ zróżnicowania właściwości plastycznych w płaszczyźnie blachy, czyli anizotropii płaskiej na rozkład odkształceń w wyłoczce.



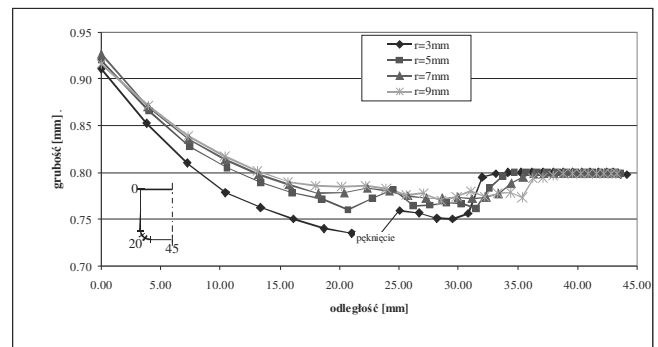
Rys. 7. Wpływ anizotropii płaskiej właściwości plastycznych na kształt wyłoczki i rozkład odkształceń plastycznych: a) wyłoczka z blachy walcowanej na zimno, b) wyłoczka z blachy wyżarzanej $\Delta r = 0$

Fig. 7. An influence of plane anisotropy on the strain distribution: a) for the cold rolled sheet, b) for the annealed sheet $\Delta r = 0$

Jak widać z rysunku konsekwencją zastosowania na wyroby tłoczone materiału o właściwościach anizotropowych jest powstawanie tzw. ucha, czyli tworzenie się falistej krawędzi w górnej części wyłoczki (rys. 7a). Ucha są wynikiem niejednakowego płynięcia metalu w różnych kierunkach w stosunku do kierunku

walcowania blachy. Zjawisko to nie występuje w przypadku materiałów izotropowych, gdzie współczynnik anizotropii płaskiej $\Delta r = \frac{1}{2}(r_{0} + r_{90} - 2r_{45}) = 0$ (rys.7b). Idealną blachą, zwłaszcza do procesu głębokiego tłoczenia w jednej operacji byłaby blacha o wysokim współczynniku anizotropii normalnej i zerowej anizotropii płaskiej Δr . Niestety jest niemal niemożliwe wyprodukowanie takiej blachy [6, 9]. Większość blach, w tym również blach tytanowych, posiadających wysoką anizotropię normalną posiada również dużą anizotropię płaską, prowadzącą do powstawania ucha. Powstawanie ucha jest niepożądane ze względu na konieczność wprowadzenia dodatkowej operacji okrawania nierówności brzegu wyłoczki. Prowadzi to do strat materiałowych, obniżenia wydajności i wzrostu kosztów produkcji. W celu uniknięcia strat materiałowych na skutek operacji okrawania ucha można optymalizować kształt materiału wyjściowego tak, aby w wyniku procesu tłoczenia można było otrzymać wyłoczkę o równej krawędzi górnej z minimalnym nadatkiem na okrawanie.

Na rysunku 8 pokazano wpływ geometrii narzędzi (promienia zaokrąglenia na matrycy i stempla) na wielkość pocienienia ścianek wyłoczki cylindrycznej.

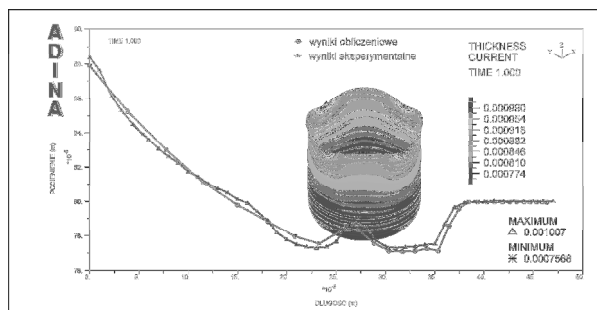


Rys. 8. Rozkład grubości wzdłuż ścianki wyłoczki – obliczenia numeryczne

Fig. 8. Thickness distribution along the cup wall – numerical calculations

Jak widać z rysunku przy zbyt małym promieniu zaokrąglenia (w analizowanym przypadku dla $r = 3$ mm) następuje nadmierne pocienienie ścianki wyłoczki w pobliżu jej dna, prowadzące w efekcie do pęknięcia wyłoczki. Wyniki obliczeń numerycznych (pocienienia ścianek wyłoczki) porównano z pocienieniem rzeczywistej wyłoczki. W tym celu

wytłoczkę cylindryczną przecięto na pół, wykonano zgląd metalograficzny i zmierzono grubość jej ścianek wzdłuż tworzącej wytłoczki. Porównanie wyników obliczeń numerycznych z wynikami badań doświadczalnych pokazano na rysunku 9.



Rys. 9. Porównanie grubości ścianek wytłoczki rzeczywistej z wynikami obliczeń numerycznych

Fig. 9. Comparison between the numerical calculation and test results – thickness of the cup wall

Duża zgodność obliczeń numerycznych z wynikami uzyskanymi podczas tłoczenia doświadczalnego wskazuje na możliwość wykorzystania symulacji numerycznych przy opracowywaniu technologii kształtowania nowych wyrobów tytanowych i narzędzi do ich tłoczenia.

6. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych i obliczeń numerycznych można stwierdzić, że:

1. W temperaturze otoczenia względnie łatwo można tłoczyć blachy z technicznie czystego tytanu, ale należy pamiętać, że:
 - tłoczność blach tytanowych jest niższa aniżeli typowych blach tłocznych, a zatem należy stosować większe promienie zaokrąglenia lub tłoczenie w podwyższonych temperaturach,
 - występuje duża tendencja do tworzenia narostów tytanu na stalowych narzędziach. Należy, zatem pamiętać o stosowaniu odpowiednich smarów technologicznych, skutecznie oddzielających powierzchnie trące.
2. Tytan i jego stopy ze względu na dużą podatność do pochłaniania gazów: tlenu, azotu i wodoru w podwyższonej temperaturze,

zwłaszcza powyżej 500°C, powinny być kształtowane w atmosferze ochronnej.

3. Kształtując blachy tytanowe na zimno należy pamiętać, że charakteryzuje je duży współczynnik anizotropii płaskiej właściwości plastycznych, co należy uwzględnić przy doborze siły docisku.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2008 jako projekt badawczy Nr N508 005 31/0440.

LITERATURA

- [1] Adamus J.: Wpływ tarcia i smarowania na odkształcalność blach stalowych i stalowych ocynkowanych w procesie tłoczenia – praca doktorska, niepublikowana, Politechnika Częstochowska, 1998.
- [2] ADINA System v.8.3. Theory and Modeling Guide, vol. I: ADINA Solids & Structures. ADINA R&D, Inc., 2005.
- [3] Azumi K., Yasui N., Seo M.: Changes in the properties of anodic oxide films formed on titanium during long-term immersion in deaerated neutral solutions. Corrosion Science, 2000, s. 885-896.
- [4] Boyer R., Welsch G., Collings E. W.: Materials Properties Handbook: Titanium Alloys, ASM International, Materials Park, OH, 1994.
- [5] Fujii H., Takahashi K., Yamashita Y.: Nippon Steel Technical Report No 88 July 2003 – Application of titanium and its alloys for automobile parts.
- [6] Gierzyńska-Dolna M., Adamus J.: Smary do procesów kształtowania blach. Przegląd Mechaniczny, 1995, nr 17-18, s. 27-34.
- [7] Jablonkov V.R., Wood J.R., Drummond B.G., Hoskinson N.P.: Processing and properties of Ti-38-644 alloy for titanium automotive suspension springs. Proceedings of the 10th World Conference Ti-2003 Science and Technology, 2004, vol. 5, s.3035.
- [8] Kosaka Y., Fox S. P., Faller K.: Newly developed titanium alloy sheets for the exhausted systems of motorcycles and automobiles. JOM, November 2004, vol.56, nr 11, s. 32-34.
- [9] Kishor N., Kumar D. R.: Optimization of initial blank shape to minimize earing in deep drawing using finite element method. J. of Materials Proc. Technology 130-131, 2002, s. 20-30.
- [10] Kutzsche K., Hennig W.: Umformfestigkeit von Titan. Neue Hütte 35, 1990, s. 149-151.
- [11] Marquardt B.J., Wood J.R., Drummond B.G.: Processing and properties of Alvac®38-644 alloy for titanium suspension springs. Outlook, Special edition, 2002, vol. 23, s. 4-8.

- [12] Melechov R., Tubielewicz K., Błaszczuk W.: Tytan i jego stopy. Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2004.
- [13] Pouilleau J., Devilliers D., Garrido F., Durand-Vidal S., Mahe E.: Structure and composition of passive titanium oxide films. *Mater. Sci. Eng. B* 47, 1997, s. 235-243.
- [14] Sitting C., Textor M., Spencer N.D. Wieland M., Valloton P.H.: Surface characterization on implant materials CP Ti, Ti6Al7Nb, Ti6Al4V with different parameters. *J. Mater. Sci., Mater. Med.* 10, 1, 1999, s. 35-46.
- [15] Yamada M.: An overview on the development of titanium alloys for non-aerospace application in Japan. *Mater. Sci. Eng. A* 213, 1996, s. 8-15.
- [16] ASTM B 265-99
- [17] Certyfikat nr 06678Y02
- [18] INOP-Z/201-12-78