



Plastyczne kształtowanie obrzeży otworów kołnierзовych w blachach tytanowych z wykorzystaniem termicznego efektu tarcia

Plastic forming of hole flange rims in titanium sheets using thermal effect of friction

(1) Tadeusz Balawender*¹, (2) Romana Ewa Śliwa¹, (3) Joanna Kosidło²

¹ Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Przeróbki Plastycznej, al. Powstańców Warszawy 8, 35-329 Rzeszów, Poland

² Polskie Zakłady Lotnicze Sp. z o.o., ul. Wojska Polskiego 3, 39-300 Mielec, Poland

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 6.10.2017

Recenzja: 18.10.2017

Akceptacja: 15.12.2017

Wkład autorów

- (1) Koncepcja i realizacja badań eksperymentalnych, opracowanie wyników i ich analiza, redakcja manuskryptu
- (2) Koncepcja badań, analiza wyników, redakcja manuskryptu
- (3) Wykonanie próbek i realizacja badań właściwości mechanicznych materiałów, redakcja manuskryptu

Streszczenie

Odształcalność tytanu i jego stopów w temperaturze otoczenia jest ograniczona, wymaga stosowania bardzo dużych nacisków oraz powoduje znaczne sprężynowanie wyrobów. Powszechnie stosowana jest zatem obróbka plastyczna na gorąco stopów tytanu, wymagająca nagrzewania materiału do wysokich temperatur (od 870 do 950°C). Możliwa jest także przeróbka plastyczna w podwyższonych temperaturach, która powoduje znaczne obniżenie granicy plastyczności i poprawę odształcalności. Podgrzewanie może być realizowane różnymi metodami, np. elektrycznymi, ogniowymi, laserem i innymi. W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych kształtowania obrzeży otworów kołnierзовych, będących istotnym elementem geometrycznym części konstrukcji, w tym lotniczych. Zastosowano innowacyjne rozwiązanie podwyższenia temperatury materiału przez tarcie grzanie obszaru kołnierza. Narzędzie stanowi wirujący stempel o stożkowej powierzchni roboczej, który trąc o powierzchnię krawędziową otworu, generuje ciepło powodujące podwyższenie temperatury materiału i jednocześnie powoduje przetłaczanie blachy w kołnierz w otworze matrycy. Taki sposób nagrzewania materiału nie wymaga stosowania dodatkowego oprzyrządowania, jest ekonomicznie uzasadniony i przyjazny środowisku. Dobór optymalnych parametrów procesu jest jednak trudny, gdyż ilość wydzielającego się ciepła zależy od wielu czynników takich jak powierzchnia tarcia, warunki tarcia, prędkość narzędzi oraz właściwości materiału. Badania przeprowadzono na uniwersalnej frezarce pionowej zmieniając prędkość obrotową stempla i posuw stołu frezarki. Stwierdzono, że stopy tytanu (w gat. Grade 2 i Grade 5) wymagają małych prędkości, gdyż zbyt duże prędkości (obrotowa stempla i posuw stołu) powodują przegrzewanie materiału, jego pękanie i nalepianie się na stempel. Dla założonych wymiarów otworu i kołnierza określono optymalne warunki realizacji procesu kształtowania.

Słowa kluczowe: stopy tytanu, plastyczne kształtowanie, nagrzewanie tarcie

Article info

Received: 6.10.2017

Reviewed: 18.10.2017

Accepted: 15.12.2017

Authors' contribution

- (1) Concept, experimental testing, preparation and analysis of the results, manuscript editing

Abstract

Deformability of titanium and its alloys in ambient temperature is restricted, needs applying of high pressure and causes considerable spring-back of products. Hot working of titanium alloys is commonly used, what means heating to high temperatures (870–950°C). Hot-cold working in heighten temperatures is applied too, because it causes reducing of yield stress and increasing of deformability. The heating can be realized by different methods, e.g. by electrical, firing, laser and other methods. The work presents the results of initial experiments of plastic forming of hole flange rims which are essential geomet-

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 17 865 16 67; e-mail: tbalaw@prz.edu.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 17 865 16 67; e-mail: tbalaw@prz.edu.pl

- (2) *Concept of research, analysis of the results, manuscript editing*
- (3) *Preparation of samples, testing of materials' mechanical properties, manuscript editing*

rical element of mechanical constructions including aviation. The innovative solution of friction heating of flange region was applied to increase of material temperature. The rotating punch was applied as a tool, which rubbing to rim surface of a hole in a sheet, generated heat and drew sheet into the flange on a die hole. Such heating manner do not require additional device, is economically motivated and environmentally friendly. The choice of process optimal parameters is difficult because the quantity of heat emission depends on many factors (mainly to friction surface size, friction conditions, speed of tools, material properties and others. The tests were realized on vertical milling machine with changing punch rotating speed and milling table feed. It was affirmed that forming of titanium alloys by this manner needs low speeds; too big speeds (rotating of punch and table feed) caused overheating of the material, its cracking and sticking to the punch. The optimal conditions of the forming process were determined for assumed dimensions of a hole and a flange.

Keywords: *titanium alloys, plastic forming, friction heating*

1. WPROWADZENIE

Tytan i jego stopy znajdują różne zastosowania techniczne, m.in. w medycynie, motoryzacji, ale też w lotnictwie (szczególnie lotnictwie wojskowym) już od ponad 60 lat. Najczęściej wykorzystywany w konstrukcjach samolotów jest tytan czysty technicznie Grade 2 oraz stop tytanu Ti-6Al-4V. Tytan czysty stosowany jest do produkcji elementów, które nie są bezpośrednio konstrukcją nośną samolotu. Ze względu na dużą odporność korozyjną i dobrą plastyczność, znalazł zastosowanie w systemach zaopatrzenia wody na potrzeby sanitarne oraz w kuchniach pokładowych, w rurociągach i przewodach [1].

Najczęściej stosowanym stopem tytanu w konstrukcji samolotu, ze względu na niski ciężar właściwy, dużą odporność na korozję oraz wysokie właściwości mechaniczne, jest stop Ti-6Al-4V [2]. Duży wpływ na właściwości mechaniczne tego stopu ma początkowa mikrostruktura i przeróbka cieplno-plastyczna. Istnieje wiele prac badawczych zajmujących się zmianami zachodzącymi w mikrostrukturze tego stopu pod wpływem obróbki cieplno-plastycznej [3, 4], a także analizujących wpływ początkowej mikrostruktury stopu Ti-6Al-4V na możliwość jego kształtowania plastycznego [5, 6, 7]. W produkcji przemysłowej stop ten jest najczęściej kształtowany w procesach kucia lub wyciskania, które różnią się zakresami prędkości odkształcania wsadu [8]. Tytan czysty technicznie w temperaturze otoczenia kształtuje się stosunkowo łatwo, natomiast stop Ti-6Al-4V w tych samych warunkach wykazuje mniejszą odkształ-

1. INTRODUCTION

Titanium and its alloys have a broad technical application, e.g. in medicine, automobile and aviation industry (especially in military aviation) from since over 60 years. Most often commercially pure titanium Grade 2 and alloy Ti-6Al-4V are applied in airplanes structures. Commercially pure titanium is not applied in airplane load-bearing structure. For the sake of good corrosion resistance and ductility, it has been applied in water supplied sanitary systems and board kitchens, pipe lines and tubing [1].

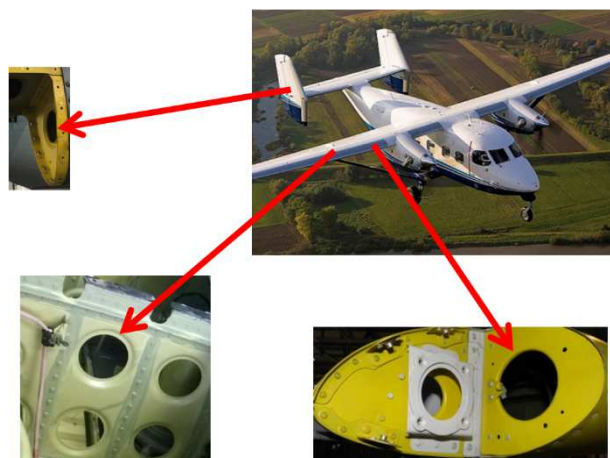
Very popular titanium alloy in airplane structure is Ti-6Al-4V, characterized by low density, high corrosion resistance and mechanical properties [2]. Mechanical properties of this alloy are influenced highly by its initial microstructure and mechanical and heat working. There is plenty of research works dealing with an influence of mechanical and heat working on changes in Ti-6Al-4V alloy microstructure [3, 4], and considering effect of initial microstructure on possibility of its plastic forming [5, 6, 7]. Forging and extrusion are main industry processing methods of this alloy, diversified of feed deformation rates [8]. Commercially pure titanium is relatively easy deformable in ambient temperatures, while in the same conditions, deformability of Ti-6Al-4V alloy is much lower, and increased temperatures have to be applied. Titanium is characterized by great susceptibility to absorption of ga-

calność i dlatego jego kształtowanie realizowane jest w podwyższonych temperaturach. Tytan cechuje też duża podatność do wchłaniania gazów: tlenu, azotu i wodoru, gdy proces kształtowania prowadzony jest w podwyższonej temperaturze. Stąd procesy kształtowania w podwyższonej temperaturze, zwłaszcza powyżej 500°C, powinny być prowadzone w atmosferze gazu ochronnego, np. argonu. Blachy tytanowe charakteryzują się również dużym współczynnikiem anizotropii płaskiej właściwości plastycznych, o czym należy pamiętać przy doborze siły docisku w procesie kształtowania na zimno [9].

Pomimo szeregu problemów, jakie powstają w trakcie realizacji procesów odkształcania materiałów tytanowych, jest on coraz szerzej stosowany w przemyśle, także lotniczym. Istnieje wiele elementów konstrukcji lotniczej obecnie wykonywanych ze stopów aluminium, które można zastąpić elementami tytanowymi i w ten sposób zwiększyć wytrzymałość konstrukcji oraz zmniejszyć jej masę. Obecnie ze stopów tytanu wykonuje się takie elementy konstrukcyjne, jak dźwigar skrzydła samolotu Boeing 787. W konstrukcji samolotu szczególnym obciążeniom poddawane są skrzydła i stateczniki samolotu. Na konstrukcję skrzydeł i stateczników składają się mniejsze elementy, tj.: podłużnice, żebra, ścianki itp. Ścianki i żebra są elementami wyposażonymi w otwory usztywniające (rys. 1), które pełnią też funkcję otworów technologicznych oraz w niektórych miejscach konstrukcji samolotu wykorzystywane są jako miejsca prowadzenia instalacji elektrycznej, paliwowej itp.

ses: oxygen, nitrogen and hydrogen, when processing is realized in increased temperature. So the inert atmosphere, e.g. argon, should be applied when forming in temperature over 500°C. Titanium sheets are characterized by big value of plastic planar anisotropy, what should be taken in to account when match the clamping load during deep drawing [9].

Despite of a lot of problems which arise during plastic deformation of titanium and its alloys, these materials are more and more applied in manufacturing industry, including aviation industry. There are many structural components of aircraft construction now made from aluminum alloys, which could be replaced by titanium elements, what should benefit from increasing construction strength and reduce its mass. Such structural elements like wing spar of Boeing 787 plane is made from titanium alloys. Aircraft wings and stabilizers are the most loaded structural elements. The construction of wings and stabilizers is composed of smaller elements like stringers, reinforced ribs, walls and others. Walls and ribs are fitted with stiffening holes (Fig. 1), which are technological holes too, and in some cases of aircraft construction are used passage for electrical, fuel installation etc.



Rys. 1. Przykłady otworów usztywniających wykorzystywanych w budowie konstrukcji samolotu M-28

Fig. 1. Examples of stringer holes used in M-28 aircraft construction

Realizacja operacji tłoczenia, przetłaczania, wywijania kołnierza, wyoblania i innych wymaga podgrzewania w celu obniżenia poziomu naprężenia uplastyczniającego i zwiększenia odkształcalności. Jedną z innowacyjnych metod grzania osiowo symetrycznych wytłoczek jest wykorzystanie termicznego efektu tarcia [10]. Metoda polega na przyłożeniu do wirującego kawałka blachy nieruchomego przyporu lub odwrotnie – do nieruchomego kawałka blachy ruchomego przyporu. Przypór może pokrywać się z całym obszarem blachy podlegającym odkształcaniu lub tylko z jego częścią. Ilość wydzielającego się ciepła zależy głównie od powierzchni tarcia, warunków tarcia, prędkości i rodzaju materiału blachy. Dla każdego kształtowanego materiału można ustalić optymalną temperaturę procesu przez odpowiedni dobór prędkości obrotowej (intensyfikując zjawisko tarcia) i posuw narzędzia formującego wyrób.

Tarciowe grzanie blach z tytanu i jego stopów może być efektywnym źródłem ciepła ze względu na duży współczynnik tarcia i mały współczynnik przewodności cieplnej tych materiałów [11, 12]. Duży współczynnik tarcia powoduje generowanie dużych ilości ciepła, które ze względu na małą przewodność cieplną materiału akumulują się w obszarze nagrzewania (kształtowania plastycznego). Ograniczeniem tego sposobu nagrzewania może być mała odporność stopów tytanu na ścieranie [13].

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

W badaniach stosowano blachy Grade 2 (o grubości 0,4 mm) i Grade 5 (o grubości 0,4 i 0,8 mm). Właściwości stosowanych materiałów określano w próbach jednoosiowego rozciągania zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2010. Stosowano próbki płaskie, wycięte z blachy i obrobione mechanicznie do kształtu zgodnego z normą. Do pomiaru odkształcenia zastosowano dwa ekstensometry: jeden do pomiaru wydłużenia, drugi do pomiaru szerokości w celu określenia anizotropii blach. Próby realizowano na maszynie wytrzymałościowej Zwick-Roell o nominalnej sile 30 kN.

Sheet metal forming, deep drawing, flanging of hole rims, spinning and others needs preheating to diminishing a level of a material flow stress and increasing its deformability. One of innovation methods of heating of axial symmetry drawpieces is applying of thermal effect of friction phenomena [10]. The method consists in imposing a fixed anvil to rotating piece of a sheet, and vice versa applying a rotating anvil to a fixed piece of a sheet. The anvil can cover all deformed sheet area or only its fraction. The amount of evolved heat depends mainly to friction surface, friction conditions, velocity and kind of material. It is possible to determine optimal temperature for each formed material, by adequate choice of rotating speed (by increasing friction conditions) and feed of tool.

Friction heating of titanium and its alloy sheets can be effective source of heat because of high friction coefficient and low thermal conductivity of these materials [11, 12]. High friction coefficient results in generating great amount of heat, which is accumulated in heated area (plastic forming area) because of material low thermal conductivity. Limitation of this heating manner could be low titanium resistance to abrasion [13].

2. EXPERIMENTAL TESTS

Two kinds of magnesium alloys were used in the tests: Grade 2 (sheet's thickness 0.4 mm) and Grade 5 (sheet's thickness 0.4 and 0.8 mm). Uniaxial tensile tests were realized to determine mechanical properties of materials according to PN-EN ISO 6892-1:2010 standards. Flat specimens, cut out from a sheet and machined to a shape according to standard were used. Two extensometers were used; one to measure specimen's elongation, second to measure broadening, what let to determine sheet's anisotropy. Zwick-Roell testing machine with capacity 30 kN was used.

Próby wywijania kołnierzy realizowano za pomocą oprzyrządowania składającego się ze stempla, matrycy i dociskacza (rys. 2). Oprzyrządowanie zamocowano na frezarce pionowej, stempel w uchwycie wrzeczona, matrycę na stole frezarki (współosiowo ze stemplem). Do badań wykonano stempel w kształcie stożka ściętego o kącie stożka $\sim 57,3^\circ$ i średnicy powierzchni czołowej $\phi 10$ mm. Matryca w kształcie tarczy posiadała centralny otwór o średnicy $\phi 28,8$ mm. Kąt stożka stempla i średnica otworu matrycy wynikały z geometrii otworów kołnierzowych, tj. usztywnień okrągłych przetłaczanych z otworami stosowanych w konstrukcji lotniczej. Próbkę do badań wycinano z arkusza blachy w kształcie kwadratów o boku 100 mm, z centralnym otworem $\phi 12$ mm (wycinanym na elektrodrążarce drutowej). Próbkę umieszczano na matrycy, współosiowo ze stemplem. W czasie prób stempel poruszał się ruchem obrotowym, podczas gdy stół, z zamontowaną matrycą i próbką poruszał się ruchem posuwowym o tę samą ustaloną wartość przemieszczenia, w wyniku której otrzymywano wartość odkształcenia krawędzi otworu w kierunku obwodowym wynoszącą $\varepsilon_\theta \approx 0,5$. W celu zabezpieczenia przed obrotem próbki stosowano dociskacz.

The tests of flanging were realized using tooling which consisted of punch, die and blank holder (Fig. 2). The tooling was fixed on vertical milling machine, the flanging punch was fixed in the milling machine spindle, the flanging die was mounted on the milling machine table coaxially with punch. The punch was in a truncated cone shape with the cone angle equal $\sim 57.3^\circ$ and the diameter of its flat surface equal $\phi 10$ mm. The die was in a shape of a disk with the central hole which diameter was equal about $\phi 28.8$ mm. The punch cone angle and the die hole dimension resulted from a geometry of hole flanges, i.e. round drawn stiffening applied in aircraft constructions. The tested specimens (blanks) were in a shape of a squares with dimensions 100 mm x 100 mm and with the central hole equal 12 mm (machined on wire electroerosion machine). The specimens were set on the milling machine table coaxially with the punch and the hole of the die. During the tests the punch was rotating, while the milling machine table with fixed die and specimen was feed moving, what resulted in deformation value of hole rim in circumferential direction equal $\varepsilon_\theta \approx 0,5$. To prevent specimen's rotation the blank holder was applied.



Rys. 2. Stanowisko badawcze stosowane w próbach wywijania kołnierzy

Fig. 2. Test attachment applied to flanging

3. WYNIKI BDAŃ I DYSKUSJA

Na podstawie wyników prób rozciągania określono krzywą umocnienia i podstawowe właściwości mechaniczne materiałów (rys. 3 i 4). Do opisu krzywych umocnienia zastosowano rów-

3. TESTS RESULTS AND DISCUSSION

The tensile tests results let to determine the flow curve and basic mechanical properties of materials (Fig. 3 and 4). The Hollomon's equation

nanie Hollomona i wyznaczono jego parametry K , n :

$$\sigma_p = K \cdot \varepsilon^n, \quad (1)$$

gdzie:

K – współczynnik umocnienia,
 n – wykładnik umocnienia.

Zastosowanie dwóch ekstensometrów do pomiaru odkształceń próbki rozciąganej pozwoliło na wyznaczenie współczynnika anizotropii normalnej Lankforda:

$$r = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3}, \quad (2)$$

gdzie:

ε_2 , ε_3 – odkształcenia, odpowiednio w kierunku szerokości próbki i w kierunku normalnym do powierzchni czołowej próbki.

was used to describe the flow curves and its K and n parameters were determined:

$$\sigma_p = K \cdot \varepsilon^n, \quad (1)$$

where:

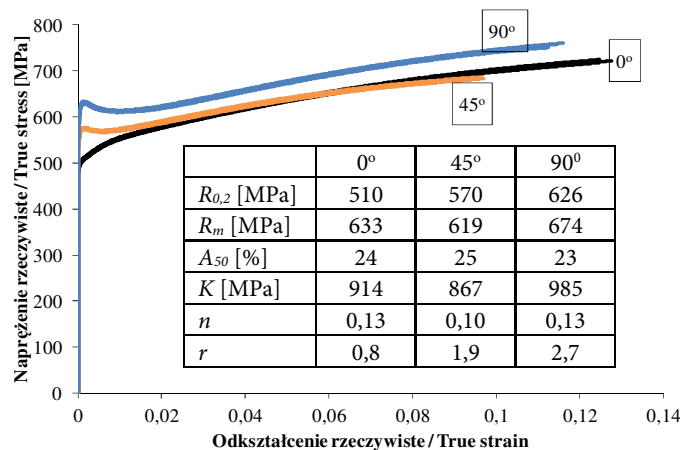
K – strength index,
 n – strain hardening exponent.

Applying two extensometers to measure specimen's deformation let to determine Lankford anisotropy coefficient:

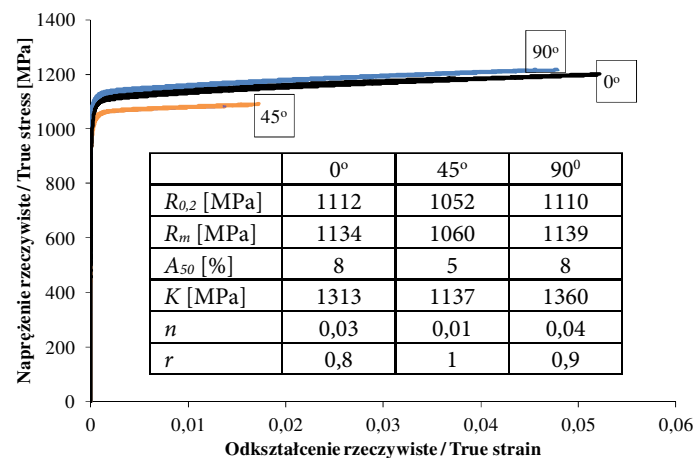
$$r = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3}, \quad (2)$$

where:

ε_2 , ε_3 – strain in width and strain through the thickness respectively.



Rys. 3. Krzywe płynięcia stopu Grade 2 (grubość blachy 0,4 mm) w trzech kierunkach względem kierunku walcowania
 Fig. 3. Flow curves of Grade 2 alloy (sheet thickness 0.4 mm) in three directions accordingly to rolling direction



Rys. 4. Krzywe płynięcia stopu Grade 5 (grubość blachy 0,4 mm) w trzech kierunkach względem kierunku walcowania
 Fig. 4. Flow curves of Grade 5 alloy (sheet thickness 0.4 mm) in three directions accordingly to rolling direction

Dla blach o grubości 0,4 mm stwierdzono prawie dwukrotnie większą wytrzymałość i dwukrotnie mniejsze wydłużenia dla gatunku Grade 5 niż dla Grade 2, co świadczy o większej plastyczności stopu Grade 2. Występują również istotne różnice w wartościach współczynników anizotropii pomiędzy tymi stopami. Średnią wartość współczynnika anizotropii normalnej \bar{r} określano wg równania:

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}, \quad (3)$$

gdzie:

r_0 , r_{45} i r_{90} - współczynniki anizotropii w kierunkach w płaszczyźnie blachy leżących pod kątem 0° , 45° i 90° względem kierunku walcowania.

Stopy Grade 2 i Grade 5 różnią się wartością \bar{r} , która wynosi odpowiednio $\bar{r} = 1,8$ i $\bar{r} = 0,9$.

Próby wywijania kołnierzy realizowano z różnymi prędkościami obrotowymi stempla, natomiast prędkość posuwu stołu frezarki była stała i wynosiła 25 mm/min. Pierwsze próby dla każdego rodzaju blachy wykonywano nieruchomym stemplem, a w kolejnych zwiększano prędkość obrotową do wartości kolejnego stopnia kinematycznego przełożenia frezarki. Próby kończono, gdy ukształtowany kołnierz był zadowalającej jakości, tj. bez pęknięć i deformacji sprężystej blachy. Wyniki wywijania kołnierzy przedstawiono na rys. 5–7.

The double greater strength and the double smaller elongation where determined for 0.4 mm sheets in Grade 5 than in Grade 2, what can be the result of greater plasticity of Grade 2. There are essential differences of anisotropy coefficients of these alloys. The average value of normal anisotropy coefficient \bar{r} was determined according to equation:

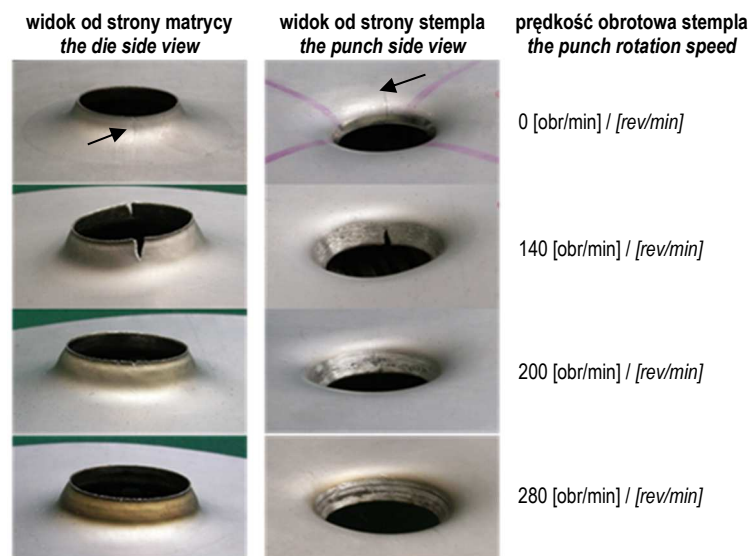
$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}, \quad (3)$$

where:

r_0 , r_{45} i r_{90} - anisotropy coefficients in the sheet plane for directions 0° , 45° and 90° to the rolling directions.

The alloys Grade 2 and Grade 5 differ in \bar{r} value which is equal respectively $\bar{r} = 1,8$ i $\bar{r} = 0,9$.

The flanging tests were realized with different rotational speed of the punch, whereas table feed motion was constant and was equal 25 mm/min. The first tests for each kind of sheet were realized by not-rotating punch, and in following tests the rotation speed was increased to the next stage of kinematic chain of the milling gear. The tests were completed when the flanges were satisfactory quality, i.e. without cracks and elastic deformation of the sheet. The results of flanging are shown in Fig. 5–7.

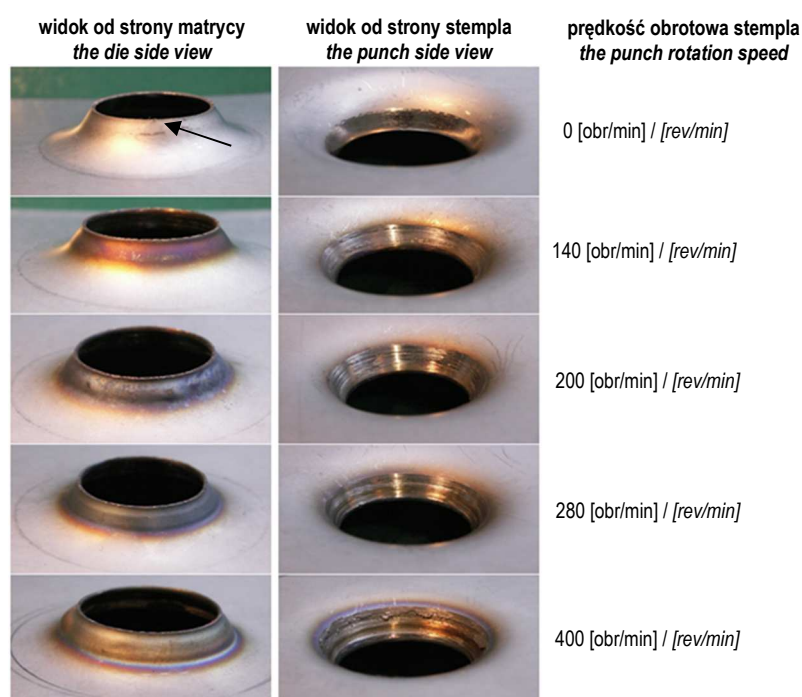


Rys. 5. Kształtowanie kołnierzy z blachy 0,4 mm z tytanu Grade 5 w zależności od prędkości obrotowej stempla

Fig. 5. Forming of flanges from 0.4 mm sheet Grade 5 versus punch rotation speed

Wywijanie kołnierza z blachy 0,4 mm z tytanu Grade 5 przez przetłoczenie nieobracającym się stemplem powodowało pęknięcie blachy (rys. 5, pęknięcia zaznaczono strzałkami). Zwiększenie prędkości stempla do 140 [obr/min] spowodowało pogłębienie zjawiska pęknięcia, a przy prędkości 200 [obr/min] nie występowało pęknięcie, ale naprężenia szczątkowe pozostałe po procesie odkształcania powodowały deformację sprężystą blachy. Zadowolający kołnierz, bez pęknięć i deformacji sprężystych blachy otrzymano przy prędkości obrotowej stempla wynoszącej 280 [obr/min].

The flanging of 0.4 mm titanium Grade 5 by drawing with not-rotating punch caused cracking of the sheet (Fig. 5, the cracks are marked by arrows). Increasing of the punch rotation speed to 140 [rev/min] caused escalation of cracking effect, and when rotation speed was equal 200 [rev/min] cracking disappeared, but residual stresses remaining after flanging process caused elastic sheet deformation. Satisfactory flange, without cracks and sheet elastic deformation was obtained when punch rotation speed was equal 280 [rev/min].



Rys. 6. Kształtowanie kołnierzy z blachy 0,8 mm z tytanu Grade 5 w zależności od prędkości obrotowej stempla

Fig. 6. Forming of flanges from 0.8 mm sheet Grade 5 versus punch rotation speed

Wywijanie kołnierza w blachach o grubości 0,8 mm w gatunku Grade 5 nieobracającym się stemplem powodowało znaczną deformację sprężystą blachy. Widoczne były inicjacje pęknięć przy krawędzi otworu kołnierza (zaznaczone strzałką na rys. 6). Duże były również przebarwienia obszaru kołnierza spowodowane utlenieniem jego powierzchni, co świadczy o generowaniu większej ilości ciepła i o wyższej temperaturze procesu niż w przypadku blachy o grubości 0,4 mm, kształtowanej z taką samą prędkością obrotową stempla. Zjawisko sprężynowania blachy nie występowało przy prędkości

The flanging of 0.8 mm titanium Grade 5 sheets, with not-rotating punch, caused considerable elastic deformation of the sheet. The fracture initiations were visible close to the flange hole edge (marked by arrow in Fig. 6). Changes of the flange region color, caused by oxidation of its surface, were great too, what was the result of generation the greater amount of heat and higher temperature of the forming process than in case of 0.4 mm sheet, formed with the same punch rotation speed. Springing effect did not occurred when punch rotation speed was equal

obrotowej stempla wynoszącej 400 [obr/min], jednak na powierzchni wewnętrznej kołnierza pojawiły się nalepienia powstałe w wyniku zatarcia materiału blachy.

Na rys. 7 przedstawiono rezultaty wywijania kołnierza w blachach o grubości 0,4 mm z tytanu Grade 2. Mimo większej odkształcalności kształtowanie kołnierza z tarciovym grzaniem blachy okazało się najtrudniejsze. Kołnierze kształtowane wirującym stemplem były niskiej jakości (przegrzane, zdeformowane i z pęknięciami) i nie udało się określić optymalnych warunków kształtowania w szerokim zakresie prędkości obrotowej stempla (od 0 do 800 [obr/min]). Również kołnierz wykonany nie-obracającym się stemplem, chociaż wizualnie najlepszy, wykazał miejsca inicjacji pęknięć (pokazane strzałkami) oraz dużą deformację sprężystą próbki.

Jedną z wielu przyczyn niskiej odkształcalności stopu Grade 2 w analizowanym procesie może być wartość współczynnika anizotropii blachy. Zakładając, że podczas procesu wywijania kołnierza, w obszarze odkształcanym blachy występuje płaski stan naprężenia (σ_1 i $\sigma_2 \neq 0$, $\sigma_3 = 0$), równanie plastyczności Hilla może być wyrażone równaniem [12]:

$$\sigma_p^2 = \sigma_1^2 - \frac{2r}{1+r} \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2, \quad (4)$$

gdzie:

σ_p – naprężenie uplastyczniające,

σ_1 , σ_2 – naprężenia w kierunkach głównych na płaszczyźnie blachy,

r – współczynnik anizotropii.

Analiza równania Hilla pozwala na stwierdzenie, że anizotropia normalna o współczynniku $\bar{r} > 1$ ($\bar{r} = 1,8$ dla Grade 2) jest korzystna w tych procesach kształtowania blachy, gdzie występuje rozciąganie ze ściskaniem (wytlaczanie, przetłaczanie, gdzie znak iloczynu jest ujemny, a iloczyn $\sigma_1 \sigma_2 < 0$), gdyż powoduje to łatwiejsze uplastycznienie materiału (równanie (4)). Jeżeli natomiast występuje dwuosiowe rozciąganie lub ściskanie, to korzystna jest anizotropia normalna ze współczynnikiem $\bar{r} < 1$ ($\bar{r} = 0,9$ dla stopu Grade 5), gdy iloczyn $\sigma_1 \sigma_2 > 0$. Można założyć, że w realizowanym procesie kształtowanie kołnierza odbywało się przez dwuosiowe rozciąganie blachy, a więc mała wartość współczynnika anizotropii stopu Grade 5 sprzyjała kształtowaniu materiału.

400 [rev/min], but on the inner surface of the punch seizures were observed.

The results of flanging of 0.4 mm titanium Grade 2 are shown in Fig. 7. Despite greater deformability of the flange, forming was the most difficult. The flanges were low quality (preheated, deformed and with cracks) and it was impossible to determine the optimal conditions of flanging in the broad range of punch rotational speed (from 0 to 800 [rev/min]). Also the flange, made by not-rotating punch, although visible the best, had cracks (shown by arrows) and had great elastic deformation.

One of the many reasons of low deformability of Grade 2 in tested process, can be low value of sheet anisotropy coefficient. Assuming flat stress state (σ_1 and $\sigma_2 \neq 0$, $\sigma_3 = 0$) in the deformed region Hill plasticity equation can be [12]:

$$\sigma_p^2 = \sigma_1^2 - \frac{2r}{1+r} \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2, \quad (4)$$

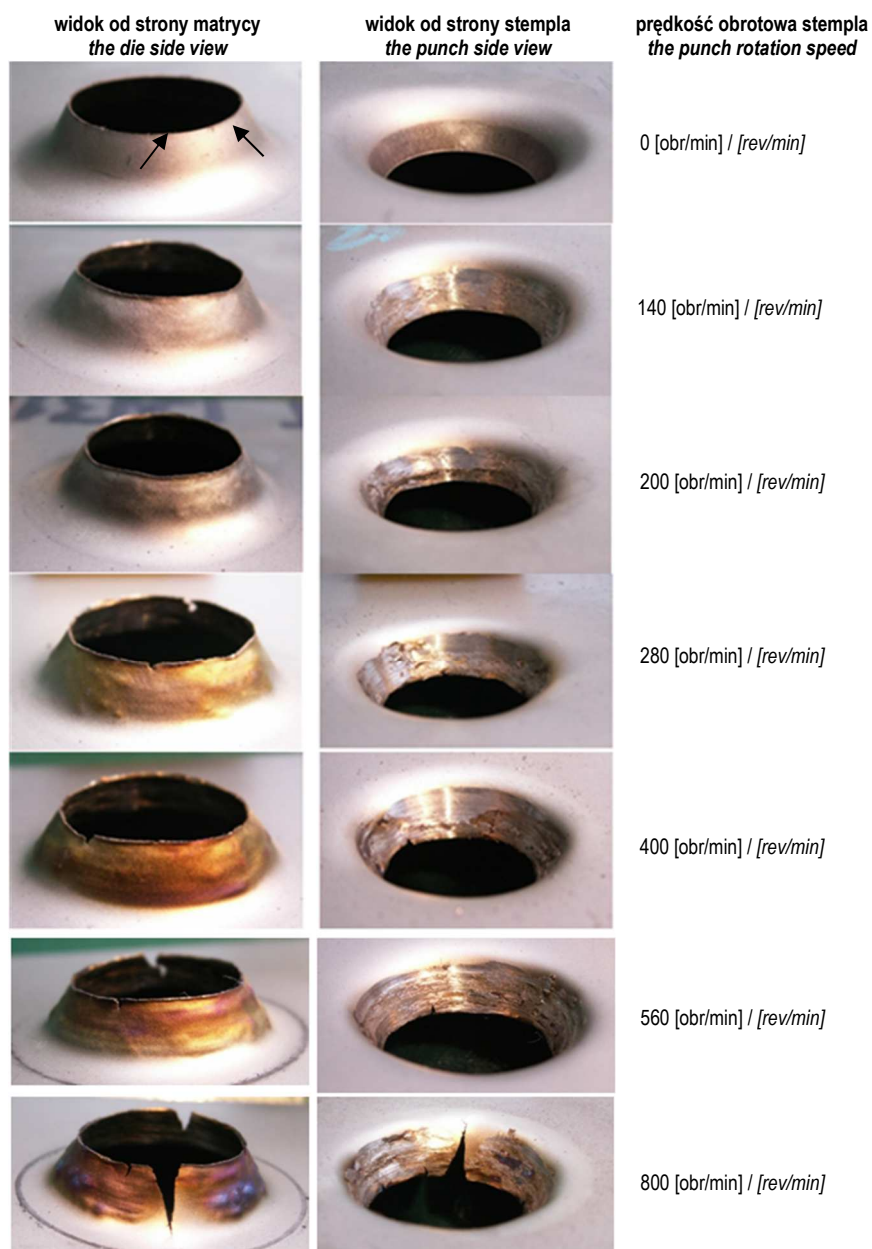
where:

σ_p – flow stress,

σ_1 , σ_2 – principal stresses in sheet plane,

r – anisotropy coefficient.

The analysis of Hill equation let to statement, that normal anisotropy with anisotropy coefficient $\bar{r} > 1$ ($\bar{r} = 1,8$ dla Grade 2) is advantageous in these sheet forming processes, where tension and compression occurs (deep drawing, redrawing where sign of product is negative, and product $\sigma_1 \sigma_2 < 0$), because material plastic deformation is easier (equation (4)). Whereas two axis tensile or compressive occurs, favourable is normal anisotropy with coefficient $\bar{r} < 1$ ($\bar{r} = 0,9$ for alloy Grade 5), when product $\sigma_1 \sigma_2 > 0$. It can be assumed that the flanging was realized by two-axis tension, so small value of anisotropy coefficient for Grade 5 was advantageous for forming process.

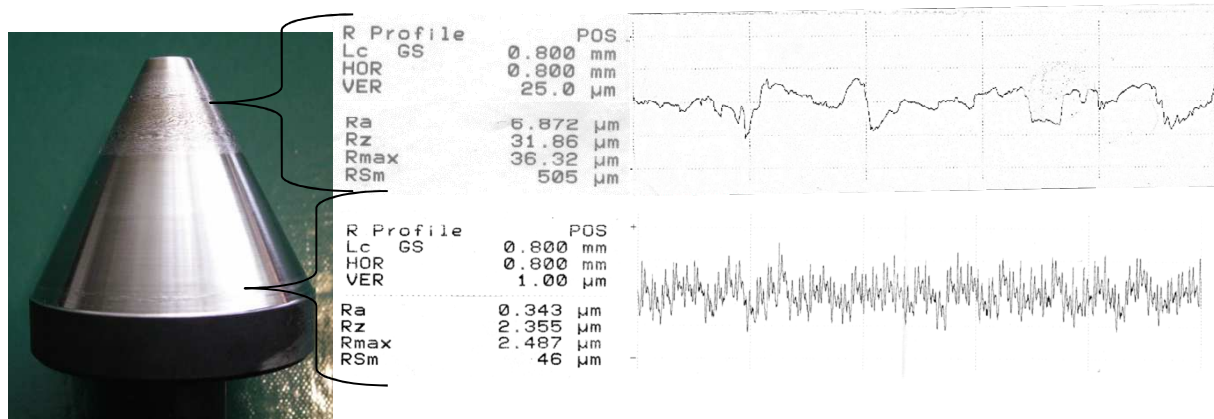


Rys. 7. Kształtowanie kołnierzy z blachy 0,4 mm z tytanu Grade 2 w zależności od prędkości obrotowej stempla

Fig. 7. Forming of flanges from 0,4 mm sheet Grade 2 versus punch rotation speed

Podczas wywijania kołnierza wirującym stemplem ulegają zmianie warunki trybologiczne kontaktu stempel – blacha, o czym świadczy profil chropowatości powierzchni stempla pokazany na rys. 8. Średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej R_a i wysokość chropowatości R_z zmieniają się odpowiednio od wartości 0,343 μm i 2,355 μm na powierzchni, która nie była w kontakcie z blachą tytanową, do wartości 6,872 μm i 31,86 μm na powierzchni, która powodowała kształtowanie kołnierza.

When flanging by rotating punch the tribological conditions of punch – sheet contact surface are changing, as it can be visible on the punch roughness profile shown in Fig. 8. Arithmetical mean deviation of the assessed profile R_a and maximum height of the profile R_z are changing respectively from value 0.343 μm and 2.355 μm on the surface which was not in contact with titanium sheet, to values 6,872 μm and 31,86 μm on the working surface of the punch.



Rys. 8. Profil i parametry chropowatości powierzchni roboczej stempla (rejestracja profilometrem stykowym MarSur SD26)

Fig. 8. Profile and roughness parameters of punch working surface (recorded by MarSur SD26 profilometer)

4. PODSUMOWANIE

Przedstawione badania wskazują na możliwość wytwarzania elementów, np. konstrukcji lotniczych z blach tytanowych poprzez plastyczne kształtowanie otworów z wywiniętym kołnierzem (np. otworów usztywniających) z wykorzystaniem termicznego efektu tarcia. W stosunku do wymagań wg obowiązujących norm w tej metodzie uzyskano znacznie większe odkształcenia plastyczne o czym świadczy otrzymana wysokość wywinięcia kołnierza bez wad.

Wykazano, że kształtowanie blach tytanowych Grade 2 i Grade 5 z tarciovym grzaniem wymaga małych prędkości. Zbyt duże prędkości (obrotowa i posuwu) powodują przegrzewanie materiału, jego pękanie i nalepianie się na stempel. Tarciove nagrzewanie materiału jest bardziej korzystne w przypadku stopów tytanu Grade 5 niż czystego tytanu Grade 2. Podczas tarciovego nagrzewania blach tytanowych pojawiają się jednak niekorzystne zjawiska charakterystyczne ze względu na termiczny efekt tarcia. Mały współczynnik przewodności cieplnej powoduje lokalne przegrzewanie materiału, a mała odporność na ścieranie powoduje lokalne szczipienia adhezyjne do metalu rodzimego oraz narzędzia. Ze względu na utlenienie powierzchni blachy i nalepianie (zacieranie) materiału na powierzchniach będących w kontakcie z narzędziem konieczne może okazać się stosowanie dodatkowej obróbki wykończeniowej, np. szlifowanie powierzchni blachy.

4. SUMMARY

The realized research shown feasibility to manufacturing elements, e.g. titanium aviation constructions by plastic forming of hole flange rims (e.g. stiffening holes) with applying thermal effect of friction phenomena. According to technical requirements in standards, the greater plastic deformations were obtained during realized flanging experiments, what is confirmed by good quality of flanges.

It was shown that forming of titanium sheets Grade 2 and Grade 5 with friction heating needs low speed of tool. High speeds (rotational and feeding) cause overheating of material, its cracks and adhesion to punch. Friction heating is more beneficial in case of titanium alloy Grade 5 than in case of titanium Grade 2. During friction heating of titanium sheets the disadvantageous phenomenon arise for the sake of thermal effect of friction. Low thermal conductivity coefficient causes local overheating of material, and low abrasion resistance causes local adhesion joints to native material and the tool. Because of fretting oxidation of sheet surface and seizing of material on surfaces being in contact with tool, additional mechanical surface treatment can be necessary to realized, e.g. sheet surface grinding.

PODZIĘKOWANIA

Badania realizowane w ramach Projektu „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”, Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

LITERATURA

- [1] Dudek Ł., T. Hryniewicz, K. Rokosz. 2016. „Zastosowanie tytanu i wybranych stopów tytanu w lotnictwie”. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* 17/8: 62–66.
- [2] Donachie M.J. 1982. *Titanium and Titanium Alloys Source Book*, 265–269. Metals Park, Ohio: American Society of Metals.
- [3] Semiatin S.L., V. Seetharaman, I. Weiss. 1999. “Flow behavior and globularization kinetics during hot working of Ti-6Al-4V with a colony alpha microstructure”. *Mater. Sci. Eng. A* 263:, 257–271.
- [4] Nicolau P.D., S.L. Semiatin. 2007. “Effect of Strain-Path Reversal on Microstructure Evolution and Cavitation during Hot Torsion Testing of Ti-6Al-4V”. *Metal and Mat. Trans. A* 38: 3023–3031.
- [5] Luo J., M. Li, W. Yu, H. Li. 2009. “Effect of the strain on processing maps of titanium alloys in isothermal compression”. *Materials Science and Engineering A* 504: 90–98.
- [6] Miller R.M., T.R. Bieler, S.L. Semiatin. 1999. “Flow softening during hot working of Ti-6Al-4V with a lamellar colony microstructure”. *Scr. Mater.* 40: 1387–1393.
- [7] Kubiak K. 2004. *Technologiczna plastyczność dwufazowych stopów tytanu odkształczanych na gorąco. Monografia*. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza P Rz.
- [8] Wojtaszek M., T. Sleboda, A. Czulak, G. Weber, W.A. Hufenbach. 2013. „Quasi-static and dynamic tensile properties of TI-6AL-4V alloy”. *Archives of Metallurgy and Materials* 58/4: 1261–1265.
- [9] Adamus J. 2008. „Wybrane problemy kształtowania blach tytanowych”. *Obróbka Plastyczna Metali XIX* (4): 31–36.
- [10] Balawender T., J. Banaś, R. Śliwa. 2015. *Sposób podgrzewania blach z materiałów trudno odkształczalnych (stopów magnezu) poddawanych wyoblaniu*. Zgłoszenie patentowe: P.411427.
- [11] Bylica A., J. Sieniawski. 1985. *Tytan i jego stopy*. Warszawa: PWN.
- [12] Filip R. 2008. *Kształtowanie mikrostruktury i właściwości warstwy wierzchniej stopów tytanu w procesie przetapiania laserowego*. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza PRz.
- [13] Erbel S., K. Kuczyński, Z. Marciniak. 1981. *Obróbka Plastyczna*. Warszawa: PWN.

ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support of Structural Funds in the Operational Programme – Innovative Economy (IE OP) financed from the European Regional Development Fund – Project “Modern material technologies in aerospace industry”, No.. POIG.01.01.02-00-015/08-00 is gratefully acknowledged.

REFERENCES

- [1] Dudek Ł., T. Hryniewicz, K. Rokosz. 2016. „Zastosowanie tytanu i wybranych stopów tytanu w lotnictwie”. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* 17/8: 62–66.
- [2] Donachie M.J. 1982. *Titanium and Titanium Alloys Source Book*, 265–269. Metals Park, Ohio: American Society of Metals.
- [3] Semiatin S.L., V. Seetharaman, I. Weiss. 1999. “Flow behavior and globularization kinetics during hot working of Ti-6Al-4V with a colony alpha microstructure”. *Mater. Sci. Eng. A* 263:, 257–271.
- [4] Nicolau P.D., S.L. Semiatin. 2007. “Effect of Strain-Path Reversal on Microstructure Evolution and Cavitation during Hot Torsion Testing of Ti-6Al-4V”. *Metal and Mat. Trans. A* 38: 3023–3031.
- [5] Luo J., M. Li, W. Yu, H. Li. 2009. “Effect of the strain on processing maps of titanium alloys in isothermal compression”. *Materials Science and Engineering A* 504: 90–98.
- [6] Miller R.M., T.R. Bieler, S.L. Semiatin. 1999. “Flow softening during hot working of Ti-6Al-4V with a lamellar colony microstructure”. *Scr. Mater.* 40: 1387–1393.
- [7] Kubiak K. 2004. *Technologiczna plastyczność dwufazowych stopów tytanu odkształczanych na gorąco. Monografia*. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza P Rz.
- [8] Wojtaszek M., T. Sleboda, A. Czulak, G. Weber, W.A. Hufenbach. 2013. „Quasi-static and dynamic tensile properties of TI-6AL-4V alloy”. *Archives of Metallurgy and Materials* 58/4: 1261–1265.
- [9] Adamus J. 2008. „Some problems with forming of the titanium sheets”. *Obróbka Plastyczna Metali XIX* (4): 31–36.
- [10] Balawender T., J. Banaś, R. Śliwa. 2015. *Sposób podgrzewania blach z materiałów trudno odkształczalnych (stopów magnezu) poddawanych wyoblaniu*. Zgłoszenie patentowe: P.411427.
- [11] Bylica A., J. Sieniawski. 1985. *Tytan i jego stopy*. Warszawa: PWN.
- [12] Filip R. 2008. *Kształtowanie mikrostruktury i właściwości warstwy wierzchniej stopów tytanu w procesie przetapiania laserowego*. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza PRz.
- [13] Erbel S., K. Kuczyński, Z. Marciniak. 1981. *Obróbka Plastyczna*. Warszawa: PWN.