

Dr inż. Janusz TOMCZAK, prof. dr hab. inż. Zbigniew PATER  
Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Lublin

# Próby doświadczalne procesu walcowania poprzeczno-klinowego odkuwek ze stopów aluminium w gatunkach PA38 i 2618A

## *Experimental tests of cross-wedge rolling process of forgings from aluminum alloys type PA38 and 2618A*

### **Streszczenie**

W artykule przedstawiono wyniki doświadczalnych prób walcowania poprzeczno-klinowego na gorąco odkuwek ze stopów aluminium w gatunkach PA38 i 2618A. Badania przeprowadzono na płasko klinowej walcierce laboratoryjnej LUW-2, wykorzystując typowe narzędzia klinowe. W trakcie eksperymentu analizowano parametry siłowe, geometryczne oraz stabilność procesu. W efekcie przeprowadzonych doświadczeń potwierdzono możliwość kształtowania wyrobów osiowo-symetrycznych ze stopów aluminium w procesach WPK.

### **Abstract**

*This paper presents results of experimental tests of cross-wedge rolling in hot conditions of forgings from aluminum alloys type PA38 and 2618A. The research works were conducted on a flat-wedge rolling mill LUW-2, with the application of typical wedge tools. During the experiment force parameters, geometrical parameters and process stability were analyzed. In the result of the conducted experiments, it was confirmed that it is possible to form axi-symmetrical parts from aluminum alloys in CWR processes.*

**Słowa kluczowe:** walcowanie poprzeczno-klinowe, stop aluminium, PA38, 2618A

**Key words:** cross-wedge rolling, aluminum alloy, PA38, 2618A

## **1. WPROWADZENIE**

Wyroby wytwarzane ze stopów metali lekkich (stopy aluminium, magnezu, tytanu) znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym. Szczególnie w lotnictwie, gdzie od materiałów wymaga się dużej wytrzymałości i odporności na zmęczenie oraz niewielkiego ciężaru, coraz częściej stosowane są stopy aluminium i tytanu. Szacuje się, że ponad 60% konstrukcji samolotu jest wykonana właśnie ze stopów aluminium, co znacząco zmniejsza masę maszyny i zużycie paliwa. Stopy aluminium charakteryzuje korzystny stosunek wytrzymałości do ciężaru właściwego. Jest on większy niż dla stali. Ponadto udarność stopów aluminium nie maleje w miarę obniżania temperatury. Dzięki temu w niskich temperaturach mają one większą udarność niż stal.

## **1. INTRODUCTION**

*Products manufactured from alloys of light metals (aluminum, magnesium, titanium alloys) are widely applied in aviation and automotive industries. Especially in aviation industry, in which materials need to be characterized by high resistance and fatigue resistance and light weight, aluminum and titanium alloys are more widely used. It is estimated that over 60% of the airplane construction is made from aluminum alloys, which considerably reduces the machine weight and fuel consumption. Aluminum alloys are characterized by favorable relation of resistance to specific gravity. This relation is larger than for steel. Moreover, impact resistance of aluminum alloys does not lower together with the decrease of temperature. Because of that, in low temperatures alloys have larger impact resistance than steel.*

Obecnie większość elementów ze stopów aluminium wytwarza się w procesach obróbki ubytkowej, a tylko nieliczna grupa wyrobów jest kształtowana plastycznie. Powoduje to duże zużycie materiałów, energii oraz zwiększa obciążenie maszyn. W związku z tym obserwuje się coraz większe zainteresowanie wdrażaniem procesów plastycznego kształtowania wyrobów ze stopów aluminium. Zastosowanie w produkcji procesów obróbki plastycznej nie tylko zmniejsza koszty wytwarzania wyrobów, ale również poprawia ich własności wytrzymałościowe i zmęczeniowe dzięki korzystnemu rozkładowi struktury.

Do najbardziej rozpowszechnionych technologii obróbki plastycznej stopów aluminium należą między innymi procesy kucia i wyciskania oraz walcowania wzdłużnego. Natomiast inne sposoby kształtowania są stosunkowo rzadko wykorzystywane ze względu na dość skomplikowany charakter płynięcia metalu oraz stosunkowo wąski przedział temperatur obróbki plastycznej.

W ramach projektu kluczowego nr PO-IG.0101.01-00-018/08 podjęto prace, mające na celu opracowanie nowych technologii wytwarzania elementów ze stopów aluminium stosowanych w przemyśle lotniczym, które umożliwią uzyskanie wyrobów o wysokich własnościach wytrzymałościowych i użytkowych, przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia materiałów i energii.

W Katedrze Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej, w której od wielu lat prowadzone są intensywne badania procesów walcowania poprzeczno-klinowego (WPK), przeprowadzono próby procesu walcowania poprzeczno-klinowego – WPK wyrobów osiowo-symetrycznych ze stopów aluminium. Schemat procesu walcowania poprzeczno-klinowego narzędziami płaskimi przedstawiono na rys. 1.

W porównaniu do innych metod wytwarzania (obróbki skrawaniem, kucia matrycowego, odlewnictwa) proces WPK odznacza się szeregiem korzystnych cech. Są to w szczególności [3, 4, 5]: wysoka wydajność, lepsze wykorzystanie materiału, polepszenie własności wytrzymałościowych, ochrona środowiska, mniejsza energochłonność, możliwość automatyzacji i niski koszt wytwarzania.

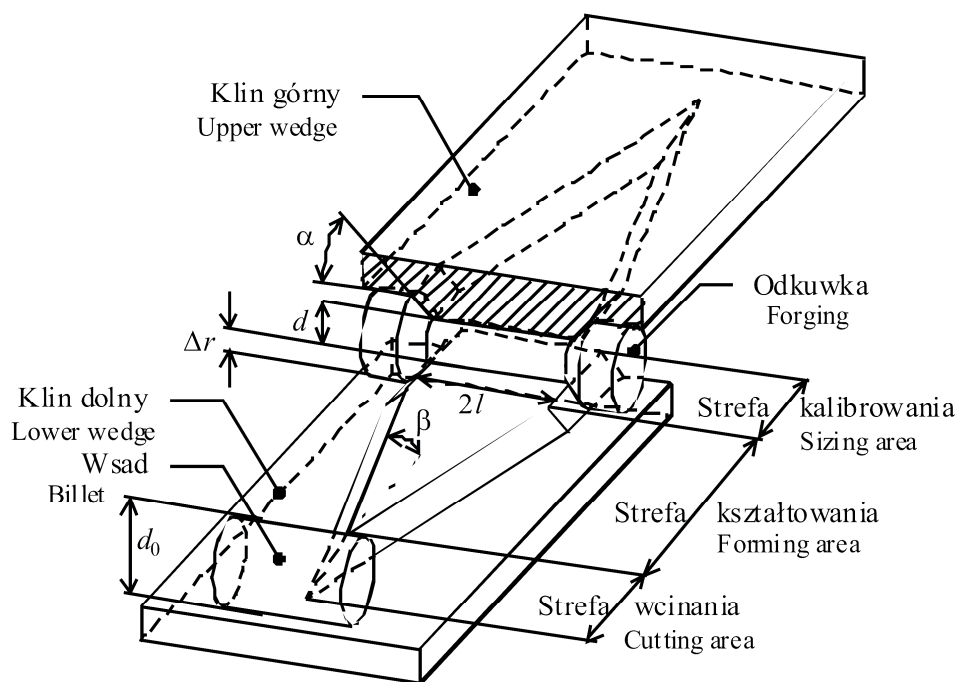
*At present, majority of elements from aluminum alloys are made in the process of machining, and only a small group of products is plastically formed. This causes large material and energy consumption and increases machines load. Because of that, it can be observed that metal forming processes of parts from aluminum alloys are more often considered. The application of metal forming processes not only reduces the costs of products manufacturing, but also improves their fatigue and resistance properties due to a favorable structure.*

*Among the most widely used metal forming technologies of aluminum alloys are forging processes, extrusion and longitudinal rolling. However, other ways of forming are relatively seldom used due to a complex character of metal flow and narrow scope of metal forming temperatures.*

*Analyses were made within the main project nr POIG.0101.01-00-018/08, which aimed at working out new technologies of manufacturing of elements from aluminum alloys used in aviation industry and which would allow for obtaining products of high resistance and functional properties, with limiting material and energy consumption at the same time.*

*In the Department of Metal Forming and Computer Modeling at Lublin University of Technology, in which intensive analyses of cross-wedge rolling processes (CWR) have been made for many years, tests of cross-wedge rolling CWR process of axi-symmetrical products from aluminum alloys have been conducted. The schema of a cross-wedge rolling process by means of flat tools is presented in Figure 1.*

*In comparison with other manufacturing methods (machining, die forging, casting), the CWR process is characterized by numerous favorable features. They are mainly [3,4,5]: high efficiency, better material usage, improvement of resistance properties, environment protection, lower energy consumption, possibility of automation and lower manufacturing cost.*



Rys. 1. Schemat procesu walcowania poprzeczno-klinowego narzędziami płaskimi, z zaznaczonymi podstawowymi parametrami [1, 2]

Fig.1. Schema of cross-wedge rolling process by means of flat tools with marked basic parameters [1,2]

Dzięki temu metoda WPK znalazła szerokie zastosowanie, przede wszystkim w przemyśle maszynowym w produkcji stalowych odkuwek wydłużonych typu stopniowanych osi i wałków [2, 3, 4]. Równie często proces WPK wykorzystuje się do wykonywania przedkuwek do kucia matrycowego wyrobów takich jak m.in.: klucze, korbowody, dźwignie, widełki, korby pedałów rowerowych [6, 7]. Do innych wyrobów kształtowanych tą metodą zalicza się: rdzenie izolatorów wysokiego napięcia [8], odkuwki części stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym (czopy mechanizmów kierowniczych, czopy układów zawieszenia itp.) [9], korpusy noży obrotowych [10] oraz wkręty szynowe [11].

## 2. ZAKRES PRAC BADAWCZYCH

Celem potwierdzenia możliwości plastycznego kształtowania stopów aluminium metodą WPK przeprowadzono szereg prób doświadczalnych walcowania na gorąco wyrobów z dwóch materiałów w gatunkach PA38 (EN AW – AlMgSi) oraz 2618A (EN AW – AlCu2Mg1,5Ni).

*Because of that, the CWR method has found wide application, mainly in machine industry for manufacturing of steel elongated forgings of stepped axles and shafts types [2, 3, 4]. The CWR process is also often used for pre-forms making for die forging of products such as: keys, connecting-rods, forks, bikes pedals cranks [6, 7]. Other products formed by means of this method include: high-voltage insulators cores [8], forgings of parts applied in automotive industry (steering gear pins, suspension parts etc.) [9], rotary cutters bodies [10] and screw spikes [11].*

## 2. SCOPE OF RESEARCH WORKS

*In order to confirm the possibility of metal forming of aluminum alloys by means of CWR, numerous experimental tests of rolling in hot conditions of products from two materials types PA38 (EN AW – AlMgSi) and 2618A (EN AW – AlCu2Mg1,5Ni) were made.*

Tablica 1. Zestawienie właściwości mechanicznych stopów aluminium PA38 oraz 2618A [12]

Table 1. Comparison of mechanical properties of aluminum alloys PA38 and 2618A [12]

Oznaczenie wg PN <i>Marking according to PN</i>	Oznaczenie wg EN <i>Marking according to EN</i>	Oznaczenie wg symboli chemicznych <i>Marking according to chemical symbols</i>	$R_{0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_5$ [%]	HB	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
PA38	6060	AlMgSi	> 140	> 180	16	60	2,7
PA30	2618A	AlCu2Mg1,5Ni	>310	>390	9	105	2,85

Stopy te znajdują szerokie zastosowanie na elementy wykorzystywane w przemyśle lotniczym. Właściwości wytrzymałościowe badanych stopów przedstawiono w tablicy 1.

Stop aluminium PA38 (6060) odznacza się średnią wytrzymałością na rozciąganie i średnią wytrzymałością zmęczeniową. Jest podatny do anodowania dekoracyjnego oraz do spawania. Stosowany jest w produkcji prętów i profili aluminiowych, wysoka podatność do tłoczenia pozwala uzyskiwać profile o skomplikowanych kształtach.

Stop aluminium 2618A przeznaczony jest do obróbki plastycznej, charakteryzuje się dobrą odpornością na korozję, wysokimi właściwościami wytrzymałościowymi oraz zmęczeniowymi, odpornością na działanie kwasów, wody morskiej, olejów i innych ośrodków agresywnych. Zachowuje swoje właściwości w podwyższonych temperaturach 200–300 °C. Znajduje zastosowanie w przemyśle lotniczym na odkuwki elementów o skomplikowanych kształtach pracujących przy dużych obciążeniach.

Badania eksperymentalne przeprowadzono na trzech zestawach płasko-klinowych segmentów narzędziowych (rys. 2a), które mocowano w specjalnych oprawach (rys. 2b) przykręcających do suwaków walcarki. Wartość stopnia gniotu  $\delta$ :

$$\delta = d_o/d,$$

gdzie:

$d_o$  – średnica wsadu,

$d$  – średnica stopnia po walcowaniu,

regulowano za pomocą specjalnych podkładek umieszczanych w oprawach pod segmentami klinowymi.

*These alloys are widely used in aviation industry. Resistance properties of the analyzed alloys are presented in table 1.*

*Aluminum alloy PA38 (6060) is characterized by mean tensile tests results and mean fatigue resistance. It is prone to decorative anodizing and to welding. It is used for bars and aluminum profiles manufacturing. High flexibility to stamping allows to obtain profiles of complex shapes.*

*Aluminum alloy 2618A is destined for metal forming. It is characterized by good resistance to corrosion, high resistance and fatigue properties; it is resistant to acid, sea water, oil and other aggressive conditions. It retains its properties in larger temperatures 200–300 °C. It is applied in aviation industry for producing forgings of elements with complex shapes working at large loads.*

*Experimental research were done on three sets of flat-wedged tools segments (Fig. 2a), which were mounted in special mounts (Fig. 2b) fixed to the rolling mill slides. The value of reduction ratio  $\delta$ :*

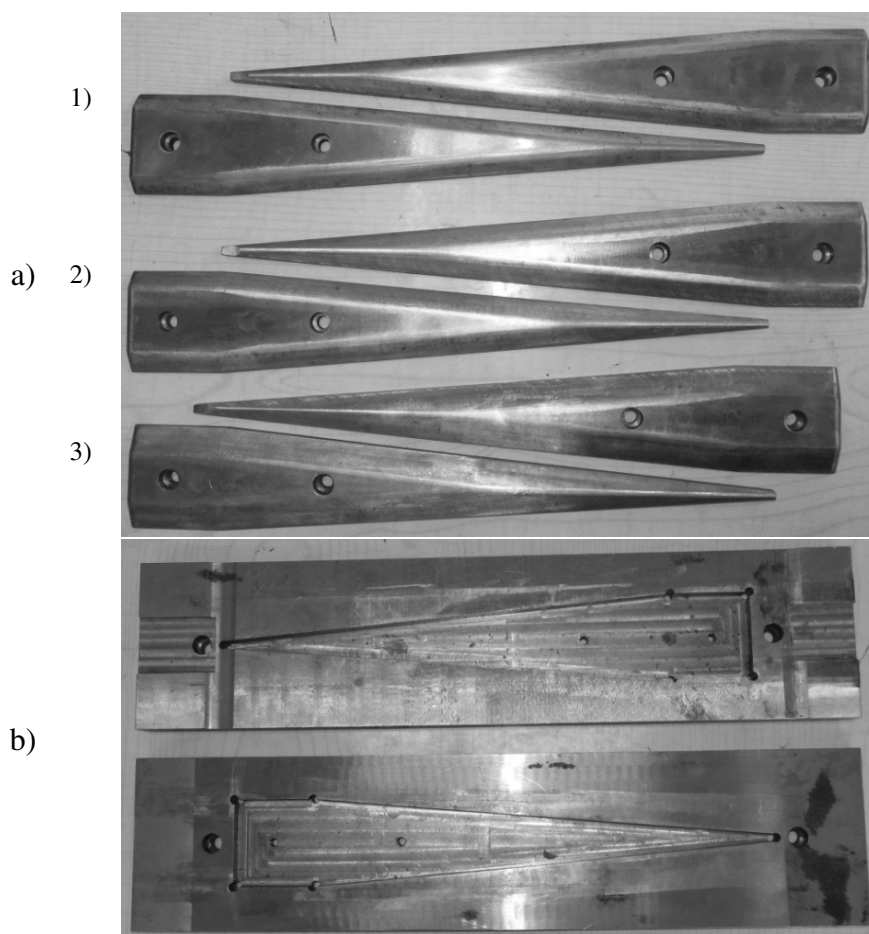
$$\delta = d_o/d;$$

*where:*

*$d_o$  – billet diameter,*

*$d$  – step diameter after rolling,*

*was regulated by means of special pads placed in mounts under the wedge segments.*



Rys. 2. Narzędzia zastosowane w badaniach doświadczalnych WPK stopów aluminium:  
a) zestawy klinów (1 -  $\alpha = 25^\circ$ , 2 -  $\alpha = 32,5^\circ$ , 3 -  $\alpha = 40^\circ$ ), b) oprawy klinów

*Fig.2. Tools used in experimental research CWR of aluminum alloys:  
a) wedge sets (1 -  $\alpha = 25^\circ$ , 2 -  $\alpha = 32.5^\circ$ , 3 -  $\alpha = 40^\circ$ ), b) wedge mounts*

Zastosowane narzędzia klinowe umożliwiły walcowanie półfabrykatów przy jednej wartości kąta rozwarcia klina  $\beta = 5^\circ$  oraz trzech różnych wartościach kąta kształtowania  $\alpha$ , wynoszących odpowiednio  $25^\circ$ ,  $32,5^\circ$  i  $40^\circ$ .

Badania przeprowadzono przy różnych stopniach gniotu  $\delta$ , którego wartość zmieniała się w przedziale od  $\delta = 1,25$  do  $\delta = 1,875$ . Zestawienie parametrów procesu oraz parametrów geometrycznych narzędzi użytych do badań przedstawiono w tablicy 2.

Próby walcowania stopów aluminium prowadzono na gorąco, nagrzewając wsad w piecu komorowym do temperatury  $450^\circ\text{C}$ . Półfabrykat (wsad) stanowiły pręty wyciskane ze stopów PA38 oraz 2618A o średnicy  $d_o = 30$  mm i długości  $l = 60$  mm. Prędkość przemieszczania się klinów wynosiła  $0,125$  m/s.

*The applied wedge tools allowed for rolling of semi-finished products at one value of spreading angle  $\beta = 5^\circ$  and three various values of forming angle  $\alpha$ , being  $25^\circ$ ,  $32.5^\circ$  and  $40^\circ$  respectively. Research works were done at different values of reduction ratio  $\delta$ , which value changed within the scope from  $\delta = 1.25$  to  $\delta = 1.875$ . The comparison of process parameters and tools geometrical parameters is shown in table 2.*

*Rolling tests of aluminum alloys were made in hot conditions, heating the billet in the box-type furnace to the temperature  $450^\circ\text{C}$ . The semi-finished product were bars extruded from alloys PA38 and 2618A of diameter  $d_o = 30$  mm and length  $l = 60$  mm. The velocity of wedges movement was  $0.125$  m/s.*

Tablica 2. Zestawienie parametrów procesu oraz parametrów geometrycznych narzędzi do walcowania metodą WPK stopów aluminium zastosowanych w próbach doświadczalnych

Table 2. Comparison of process parameters and tools geometrical parameters for rolling by means of CWR of aluminum alloys used in experimental tests

Lp.	Materiał Material		Kąt rozwarcia Spreading angle	Kąt kształtowania Forming angle	Stopień gniotu Reduction ratio	Średnica wsadu Billet diameter	Średnica walcowanego stopnia Diameter of rolled step		
			$\beta$ [°]	$\alpha$ [°]	$\delta$	$d_o$ [mm]	$d$ [mm]		
1	PA38	2618A	7	25	1,875	30	16		
2					1,5		20		
3					1,25		24		
4			7	32,5	7	32,5	1,87	30	16
5							1,67		18
6							1,5		20
7							1,36		22
8							1,25		24
9			7	40	7	40	1,875	30	16
10							1,5		20
11							1,25		24

Do badań wykorzystano płasko-klinową walcarkę laboratoryjną LUW-2, znajdującą się na wyposażeniu Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej.

*In the research, the flat-wedged laboratory rolling mill LUW-2 was used. This mill is the equipment of the Department of Metal Forming and Computer Modeling at Lublin University of Technology.*

### 3. WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

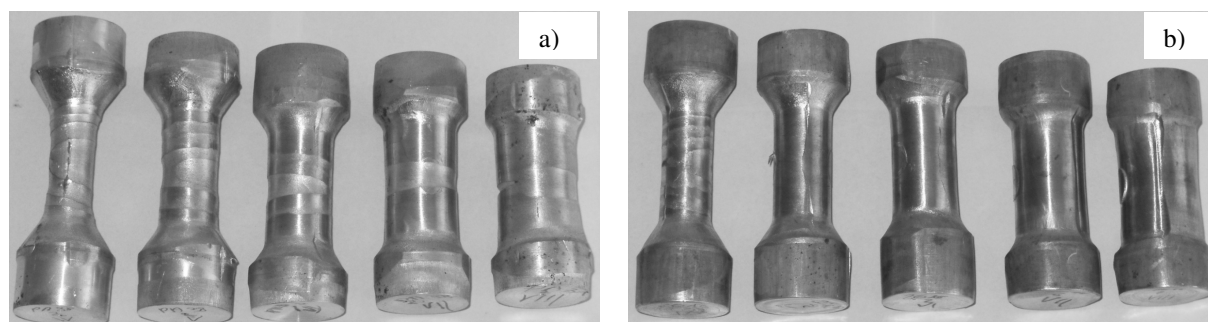
Głównym celem badań doświadczalnych było potwierdzenie możliwości procesu walcowania poprzeczno-klinowego (WPK) odkuwek ze stopów aluminium. W czasie prób eksperymentalnych, analizowano parametry siłowe procesu oraz parametry geometryczne uzyskanych wyrobów. Przykładowe odkuwki ze stopu PA38 oraz 2618A ukształtowane w procesie WPK przy  $\alpha = 32,5^\circ$ ,  $\beta = 5^\circ$  oraz ze stopniem gniotu zmieniającym się od  $\delta = 1,25$  do  $\delta = 1,875$ , przedstawiono na rys. 3.

Analizując geometrię uzyskanych wyrobów można zauważyć, że duży wpływ na jakość i dokładność odkuwek wywierały takie parametry procesu jak wartość stopnia gniotu, kąty segmentów narzędziowych oraz rodzaj walcowanego materiału (gatunek stopu aluminium).

### 3. RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH

*The main aim of experimental research was to confirm the possibility of cross-wedge rolling process (CWR) of forgings from aluminum alloys. During experimental tests the process force parameters and geometrical parameters of the obtained products were analyzed. Examples of forgings from alloy PA38 and 2618A formed in the CWR process at  $\alpha = 32.5^\circ$ ,  $\beta = 5^\circ$  and with reduction ratio changing from  $\delta = 1.25$  to  $\delta = 1.875$  are presented in Fig. 3.*

*Analyzing the geometry of the obtained products it can be noticed that large influence on quality and precision of forgings had such process parameters as value of reduction ratio, tools segments angles and type of the rolled material (type of aluminum alloy).*



Rys. 3. Odkuwki otrzymane w procesie WPK stopu: a) PA38 b) 2618A. Parametry narzędzi:

$\alpha = 32,5^\circ$ ,  $\beta = 5^\circ$ . Stopnie gniotu: odpowiednio od lewej  $\delta = 1,875$ ,  $\delta = 1,67$ ,  $\delta = 1,5$ ,  $\delta = 1,36$ ,  $\delta = 1,25$

Fig. 3. Forgings obtained in CWR process of alloy a) PA38 b) 2618A. Tools parameters  $\alpha = 32,5^\circ$ ,  $\beta = 5^\circ$ .

Reduction ratios: from the left respectively  $\delta = 1.875$ ,  $\delta = 1.67$ ,  $\delta = 1.5$ ,  $\delta = 1.36$ ,  $\delta = 1.25$

Podczas walcowania stopu bardziej plastycznego - PA38 zaobserwowano na powierzchniach kształtowanego przewężenia powstawanie śrubowych rowków (rys. 3a), których głębokość zwiększała się wraz ze wzrostem stopnia gniotu. Zaobserwowane spiralne wgłębienia są stosunkowo niewielkie w wyrobach, które walcowano segmentami o małych wartościach kąta kształtowania ( $\alpha = 25^\circ$ ) i dodatkowo zanikają wraz ze zmniejszającym się stopniem gniotu. Natomiast przy walcowaniu stopu 2618A, który charakteryzuje się znacznie większą wytrzymałością i mniejszą plastycznością w temperaturze  $450^\circ\text{C}$ , spiralne rowki powstają dopiero przy dużych stopniach gniotu ( $\delta \geq 1,875$ ) oraz większych wartościach kąta kształtowania ( $\alpha > 25^\circ$ ) (rys. 3b). Przy czym rowki te mają znacznie mniejszą głębokość w stosunku do zaobserwowanych na odkuwkach walcowanych ze stopu PA38.

Przyczyną powstawania śrubowych wgłębień na walcowanych stopniach wyrobów ze stopu PA38 jest zjawisko owalizacji przekroju poprzecznego odkuwki w fazie wcinania się narzędzi, co w połączeniu z dużą plastycznością tego stopu powoduje, że ukształtowany przez narzędzia klinowe spiralnie rozszerzający się rowek nie jest usuwany w strefie kształtującej i kalibrującej narzędzi przez obciskanie walcowanego przewężenia płaskimi powierzchniami segmentów. Opór plastycznego odkształcenia metalu jest tak niewielki, że płynie on intensywnie wzdłuż osi odkuwki, a ukształtowany w pierwszym etapie śrubowy rowek pozostaje do końca procesu, co może świadczyć, że narzędzia stykają się z walcowa-

During rolling of more plastic alloy PA38, at the surfaces of formed necking the presence of screwed grooves (Fig. 3a) was observed, which depth increased together with the increase of reduction ratio. The observed spiral grooves are relatively small in products which were rolled with segments of small values of forming angles ( $\alpha = 25^\circ$ ), and, additionally, they disappeared together with lowering reduction ratio. However, during rolling of alloy 2618A, which is characterized by considerably larger resistance and smaller plasticity in temperature  $450^\circ$ , spiral grooves appeared only at large values of reduction ratio ( $\delta \geq 1.875$ ) and larger values of forming angle ( $\alpha > 25^\circ$ ) (Fig. 3b). Yet, these grooves have considerably lower depth in comparison with grooves observed on forgings rolled from alloy PA38.

The cause of screwed grooves presence on rolled steps of products from alloy PA38 is the phenomena of cross-section ovalization of forging in the phase of tools cutting into the forging, which, in connection with large plasticity of this alloy, means that formed by wedge tools spirally widening groove is not removed in the tools forming and sizing areas by reducing of the rolled necking by means of segments flat surfaces. Resistance of metal plastic strain is so small that it flows intensively along the forging axis, and the screwed groove formed at the first stage of the process is present until the process end, which may mean that tools contact with the rolled forging only at side surfaces of the rolled necking,

ną odkuwką tylko na powierzchniach bocznych walcowanego przewężenia, natomiast część cylindryczna nie ma styku z powierzchniami płaskimi narzędzi.

Podczas procesu WPK stopu PA38 z dużymi stopniami gniotu ( $\delta \geq 1,67$ ) pojawia się wyraźne przewężenie w środkowej części walcowanego stopnia, którego kształt zaczyna przypominać szyjkę tworzącą się w statycznej próbie rozciągania metali. Oznacza to, że naprężenia rozciągające wywołane naciskiem bocznych powierzchni narzędzi osiągnęły wartość naprężeń uplastyczniających, czemu towarzyszy gwałtowne płynięcie metalu w kierunku osiowym. Przewężenie walcowanego stopnia odkuwki zaobserwowano tylko dla stopu PA38, walcowanego segmentami o większych wartościach kąta kształtowania ( $\alpha \geq 32,5^\circ$ ) z dużymi stopniami gniotu ( $\delta \geq 1,67$ ). Przy małych wartościach kąta kształtowania ( $\alpha < 32,5^\circ$ ) przewężenia nie występują nawet przy walcowaniu z maksymalnym zastosowanym stopniem gniotu ( $\delta = 1,875$ ).

Należy wspomnieć, że proces tworzenia się przewężenia przyśpieszają śrubowe rowki na powierzchni walcowanego stopnia. Powstawanie przewężenia na walcowanym stopniu odkuwki ogranicza wartość redukcji przekroju możliwą do uzyskania w procesie WPK stopu PA38 w jednym przejściu. Natomiast na powierzchniach odkuwek ukształtowanych w procesie WPK ze stopu 2618 nie zaobserwowano przewężenia walcowanego stopnia w całym zakresie stosowanych stopni gniotu i kątów kształtowania. Oznacza to, że dla stopu 2618A można uzyskać znacznie większą redukcję przekroju poprzecznego w jednym przejściu, dzięki czemu zwiększa się wydajność procesu oraz rozszerza zakres stosowania procesu WPK dla tego materiału.

Powierzchnie wyrobów ze stopów aluminium ukształtowanych w procesie WPK w zakresie gniotów  $\delta < 1,875$  dla stopu 2618A oraz  $\delta \leq 1,25$  dla stopu PA38 charakteryzują się wysoką jakością i gładkością porównywalną z powierzchniami uzyskiwanymi w procesach szlifowania. Pozwala to na kształtowanie elementów z minimalnymi naddatkami na obróbkę mechaniczną.

*however, the cylindrical part has no contact with tools flat surfaces.*

*During the CWR process of alloy PA38 with large reduction ratios ( $\delta \geq 1.67$ ), a well visible necking appeared in the middle of the rolled step, which shape seems to resemble a neck present in a static tensile test. It means that tensile stresses caused by tools side surfaces pressure reached values of yield stresses, which was connected with rapid metal flow in axial direction. The necking of the rolled forging step was observed only for alloy PA38, rolled with segments of larger values of forming angle ( $\alpha \geq 32.5^\circ$ ), with large reduction ratio ( $\delta \geq 1.67$ ). At small values of forming angle ( $\alpha < 32.5^\circ$ ) necking does not appear even at rolling with maximal reduction ratio ( $\delta = 1.875$ ).*

*It should be, however, mentioned that the process of necking forming is accelerated by screwed grooves on the surface of the rolled step. The presence of necking on the forging rolled step limit the value of section reduction possible to obtain in the CWR process of alloy PA38 in one working cycle. However, at the surfaces of forgings formed in the CWR process of alloy 261,8 the necking of rolled step was not observed within the whole scope of applied reduction ratios and forming angles. This means that for alloy 2618A it is possible to obtain considerably larger reduction of cross section in one working cycle, which increases the process effectiveness and widens the scope of the CWR process application for this material.*

*Surfaces of products from aluminum alloys formed in CWR process within the reduction ratios scope  $\delta < 1.875$  for alloy 2618A and  $\delta \leq 1.25$  for alloy PA38 are characterized by high quality and smoothness comparable with surfaces obtained during grinding. This allows for forming of elements with minimal allowance for machining.*



W trakcie badań doświadczalnych procesu WPK odkuwek ze stopów aluminium analizowano także parametry siłowe procesu, których znajomość ma duże znaczenie na etapie opracowywania procesów technologicznych. Trafne określenie wartości sił umożliwia prawidłowy dobór walcarki do realizacji procesu, a znajomość rozkładów sił pozwala na prognozowanie zakłóceń ograniczających możliwość otrzymania prawidłowych wyrobów.

Przykładowe przebiegi sił, w zależności od drogi narzędzia zarejestrowane podczas procesu WPK odkuwek ze stopu PA38 narzędziami o kącie kształtowania  $\alpha = 32,5^\circ$  przy gnioście bezwzględny  $\Delta r$  zmieniającym się co 1 mm przedstawiono na rys. 4. Zaskakujące są wartości sił zarejestrowane podczas walcowania z najmniejszym gniościem bezwzględny  $\Delta r = 3$  mm (rys. 4), dla którego otrzymane wartości sił są większe w porównaniu do zarejestrowanych podczas walcowania odkuwek z większymi redukcjami przekroju. Przypuszczalnie spowodowane jest to niedograniem wsadu, który przebywał w piecu znacznie krócej w stosunku do pozostałych półfabrykatów. Natomiast zgodnie z przewidywaniami wartości sił dla pozostałych prób walcowania zwiększają się wraz ze wzrastającym stopniem gniościu.

Cechą charakterystyczną przebiegów pokazanych na rys. 4 jest gwałtowny wzrost siły kształtowania (stycznej) w strefie wcinania narzędzi klinowych, który trwa do chwili osiągnięcia przez segmenty klinowe granicy strefy wcinania i kształtowania. Szybki wzrost siły na tym etapie walcowania spowodowany jest wcinaniem się narzędzi w materiał, które zagłębiają się stopniowo w kształtowany wyrób na głębokość  $\Delta r$ , redukując jego średnicę do wymaganej wartości równej  $d$ . Następnie obserwuje się względne ustabilizowanie siły, po czym gwałtowny jej spadek do zera w strefie kalibrowania.

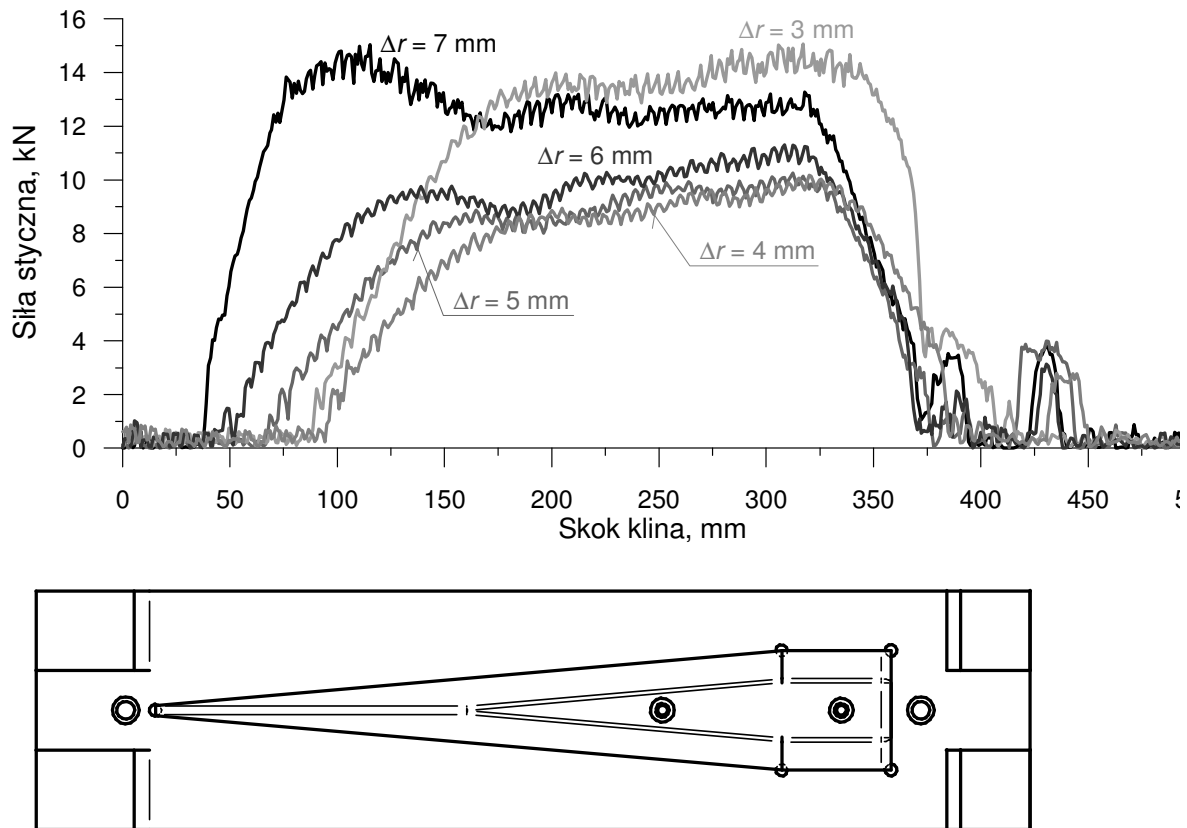
Na uwagę zasługuje fakt, że podczas walcowania odkuwek ze stopu PA38 z dużymi stopniami gniości ( $\delta \geq 1,5$ ) obserwuje się spadek siły stycznej w strefie kształtowania (rys. 4). Przypuszczalnie taki przebieg sił związany jest z rozciąganiem walcowanego stopnia odkuwki.

*During experimental research of the CWR process of forgings from aluminum alloys the process force parameters were also analyzed, the knowledge of which has large importance during working out technological processes. The proper determining of forces values allows for appropriate choice of the rolling mill for the process realization, and the knowledge of forces distributions allows for predicting phenomena disturbing the possibility of proper products obtaining.*

*Examples of forces course, depending on tool movement, observed during the CWR process of forgings from alloy PA38 with tools of forming angle  $\alpha = 32,5$  at reduction ratio  $\Delta r$  changing every 1 mm, are shown in Fig. 4. Values of forces measured during rolling with the smallest absolute reduction ratio  $\Delta r = 3$  mm (fig. 4), for which obtained force values are larger in comparison with observed during rolling of forgings with larger section reduction, are surprising. It is probably caused by not adequate heating of the billet which was in the furnace shorter than other semi-finished products. Yet, as it was foreseen, force values for other rolling tests increase together with the increasing reduction ratio value.*

*Characteristic feature of distributions shown in Fig. 4 is a rapid increase of forming force (tangent) in the area of wedge tools cutting, which lasts till the wedge segments reach the border of forming and cutting area. The rapid increase of the force at this stage of rolling is caused by tools cutting into material, which immerse gradually into the formed product on the depth  $\Delta r$ , reducing its diameter to the required value equal  $d$ . Next, force stability is observed, and later its rapid decrease to zero in sizing area.*

*It should be noticed that during rolling of forgings from alloy PA38 with large reduction ratios ( $\delta \geq 1.5$ ), the decrease of tangent force in the forming area is observed (Fig. 4). This course of the force is probably connected with stretching of the forging rolled step.*



Rys. 4. Rozkłady sił kształtowania wyznaczone w trakcie WPK odkuwek ze stopu PA38 realizowanego z różnymi wartościami stopnia gniotu  $\delta$  przy pozostałych parametrach:  $\alpha = 32,5^\circ$ ,  $T = 450^\circ\text{C}$ ,  $v = 0,125\text{ m/s}$

Fig. 4. Distribution of forming forces determined during CWR of forgings from alloy PA38 realized at various values of reduction ratio  $\delta$  and other parameters:  $\alpha = 32,5^\circ$ ,  $T = 450^\circ\text{C}$ ,  $v = 0.125\text{ m/s}$

Podczas walcowania z maksymalnym gniotem  $\Delta r = 7\text{ mm}$  odnotowany spadek siły stycznej w strefie kształtowania jest bardzo duży i wynosi blisko 20% całkowitej siły. Tak duży spadek siły kształtowania można wyjaśnić intensywnym płynięciem metalu wzdłuż osi odkuwki i tworzeniem się przewężenia w środkowej części walcowanego stopnia (rys. 3a).

W trakcie badań laboratoryjnych analizowano również wpływ geometrii segmentów klinowych na wartość siły stycznej. Zaobserwowano, że zwiększanie wartości kąta kształtowania  $\alpha$  powoduje spadek wartości siły. Dla przykładu podczas walcowania stopu PA38 ze stopniem gniotu równym  $\delta = 1,5$  segmentami klinowymi o kątach kształtowania wynoszącymi odpowiednio  $\alpha = 25^\circ$ ,  $32,5^\circ$ ,  $40^\circ$  zarejestrowano maksymalne siły styczne na poziomie 12 kN, 10 kN oraz 9,5 kN.

During rolling with maximal reduction ratio  $\Delta r = 7\text{ mm}$ , the observed decrease of tangent force in the forming area is very big and it estimates almost 20% of the total force. Such a large decrease of forming force can be explained by intensive metal flow along the forging axis and the presence of necking in the middle part of the rolled step (Fig. 3a).

During laboratory research, the influence of wedge segments geometry on value of tangent force was also analyzed. It was observed that the increase of forming angle  $\alpha$  causes the reduction of force value. For example, during rolling of alloy PA38 with reduction ratio  $\delta = 1.5$  by means of wedge segments of forming angles  $\alpha = 25^\circ$ ,  $32,5^\circ$ ,  $40^\circ$ , it was noticed that maximal tangent forces were 12 kN, 10 kN and 9.5 kN.

Natomiast podczas walcowania stopu 2618A z tymi samymi parametrami maksymalne siły styczne wynosiły odpowiednio 16 kN dla  $\alpha = 25^\circ$ , 14 kN dla  $\alpha = 32,5^\circ$  oraz 12,5 kN dla  $\alpha = 40^\circ$ . Zaobserwowany spadek wartości sił stycznych przy zwiększających się kątach  $\alpha$  przypuszczalnie jest spowodowany zmniejszaniem się powierzchni styku narzędzia z walcowanym stopniem odkuwki oraz rozciąganiem kształtowanego stopnia wyrobu przez boczne powierzchnie narzędzi.

#### 4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania doświadczalne potwierdzają możliwość kształtowania wyrobów osiowo-symetrycznych ze stopów aluminium metodą walcowania poprzeczno-klinowego - WPK. Próby walcowania stopów PA38 oraz 2618A, szeroko stosowanych w przemyśle lotniczym dały bardzo obiecujące wyniki. W trakcie eksperymentu analizowano przebieg procesu pod kątem jego stabilności oraz zjawisk ograniczających stosowanie metody WPK do kształtowania wyrobów ze stopów aluminium. Analizie poddano również parametry siłowe, których znajomość jest niezwykle ważna z technologicznego punktu widzenia.

Przeprowadzona analiza doświadczalna procesu WPK stopów aluminium pozwala sądzić, że może być on z powodzeniem stosowany do kształtowania zarówno przedkuwek, które ułatwiają wypełnianie wykroju w kolejnych operacjach kucia, jak również gotowych wyrobów typu stopniowane wałki, osie oraz odkuwki osiowo – symetryczne, w których pozostawia się minimalne naddatki na obróbkę mechaniczną. Wyroby walcowane ze stopu 2618A charakteryzują się wysoką jakością i dokładnością.

Natomiast odkuwki kształtowane w procesie WPK ze stopu PA38 (bardziej plastycznego) ze względu na występujące śrubowe rowki na powierzchni ukształtowanego przewężenia wymagają pozostawienia znacznie większych naddatków w przypadku wytwarzania wyrobów gotowych, lub walcowania ze znacznie mniejszymi stopniami gniotu.

*However, during rolling of alloy 2618A with the same parameters, maximal tangent forces were 16 kN for  $\alpha = 25^\circ$ , 14 kN for  $\alpha = 32.5^\circ$  and 12.5 kN for  $\alpha = 40^\circ$ . The observed decrease of tangent forces value at increasing angles  $\alpha$  is probably caused by decreasing of surface of contact of tool with forging rolled step and with stretching of product formed step by tools side surfaces.*

#### 4. SUMMARY

*The conducted experimental research confirm the possibility of forming of axisymmetrical products from aluminum alloys by means of cross-wedge rolling method CWR. Tests of rolling of alloys PA38 and 2618A, widely applied in aviation industry provided satisfactory results. During the experiment the process was analyzed concerning its stability and phenomena limiting the application of CWR for forming of products from aluminum alloy. Force parameters, knowledge of which is extremely important from the technological point of view, were analyzed as well.*

*The conducted experimental analysis of the CWR process of aluminum alloys allows to assume that this process can be successfully applied for forming both performs, which make easier filling the impression during particular forging operations, and finished products of stepped shafts and axles types and axisymmetrical forgings, in which minimal allowances are left for machining. Products rolled from alloy 2618A are characterized by high quality and precision.*

*However, forgings made from PA38 (with bigger plasticity) in the CWR process require larger allowance in the case of finished products forming, due to screwed grooves on the surface of the formed necking, or rolling with smaller reduction ratio.*

Jednak ze względu na obszar zastosowań stopu PA38, przede wszystkim na mało obciążone odkuwki proces WPK tego materiału może być z powodzeniem stosowany do kształtowania wszelkiego rodzaju przedkuwek, w których śrubowe wgłębienia na powierzchni nie mają większego wpływu na jakość gotowego wyrobu.

Przeprowadzone badania potwierdziły przypuszczenie, że duży wpływ na jakość i dokładność wyrobów mają takie parametry jak wartość stopnia gniotu, kąty segmentów narzędziowych oraz rodzaj walcowanego materiału.

Analiza sił zmierzonych podczas procesu WPK odkuwek ze stopów aluminium wykazała, że zwiększenie wartości stopnia gniotu  $\delta$  powoduje wzrost sił kształtowania. Natomiast wzrost wartości kąta kształtowania  $\alpha$  przynosi efekt odwrotny.

*Badania realizowano w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.0101.02-00-015/08 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.*

*Considering the area of PA28 alloy application, it can be successfully used for forming of various performs, in which screwed grooves on the surface have no larger influence on the finished product quality.*

*Conducted research works confirmed the assumption that parameters such as reduction ratio value, wangles of tools segments and type of rolled material have large influence on quality and precision of products.*

*The analysis of forces measured during the CWR process of forgings from aluminum alloy showed that the enlarging of reduction ratio value  $\delta$  resulted in the increase of forming force. However, the increase of forming angle value  $\alpha$  have the opposite effect.*

#### Acknowledgements

*Financial support of Structural Funds in the Operational Programme – Innovative Economy (IEOP) financed from the European Regional Development Fund – Project No POID.0101.02-00-015/08 is gratefully acknowledged.*

## LITERATURA/REFERENCES

- [1] Pater Z.: Walcowanie poprzeczno-klinowe. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2009.
- [2] Pater Z., Weroński W.: Podstawy procesu walcowania poprzeczno-klinowego. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 1996.
- [3] Klušín V.A., Makušok E.M., Ščukin V.Ja.: Sovershenstvovanie poperečno-klinovoj prokatki. Minsk: Nauka i Technika 1980.
- [4] Transverse rolling proves its uses in components field. The Engineer 5 November 1970 s. 55-58.
- [5] Wang M.T., Li X.T., Du F.S. Current trends in cross wedge rolling for part forming. ISIJ International 2005 vol. 45 s. 1521-1525.
- [6] Belmont K.: Commercial wedge rolling in the United States. W: Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference on Rotary Metalworking Processes October 6<sup>th</sup> – 8<sup>th</sup> 1982, Stratford upon Avon UK s. 385-397.
- [7] Developments in rotary metalworking. Machinery and Production Engineering 2 February 1983 s. 34-35.
- [8] Lisowski J.: Walcowanie kuźnicze. Warszawa: WNT 1979.
- [9] Dorożej V.I., Margolin B.M., Seljukov V.N.: Izgotovlenije zagotovok šarovych pal'cev rulevych tjağ metodom poperečno – klinovoj prokatki. Kuznečno – Štampovočnoe Proizvodstvo 1975 nr 1 s. 36-38.
- [10] Pater Z., Gontarz A., Weroński W.: Analiza możliwości zastosowania walcowania poprzeczno-klinowego do wytwarzania korpusów noży obrotowych. W: Badania teoretyczno-technologiczne procesów plastycznego kształtowania metali. Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej 2004 s. 13-41.
- [11] Gontarz A., Łukasik K., Pater Z., Weroński W.S.: Technologia kształtowania i modelowanie nowego procesu wytwarzania wkrętów kolejowych, Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej 2003.
- [12] Dobrzański L.A.: Metalowe materiały inżynierskie. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004.