



Fizyczne modelowanie plastycznego płynięcia w procesie wyciskania metodą KOBO z użyciem matryc o różnej geometrii

Physical modeling of plastic flow in the KOBO extrusion process using dies of different geometry

(1) Marek Zwolak*, (2) Romana Ewa Śliwa

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

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 6.10.2017

Recenzja: 23.10.2017

Akceptacja: 15.12.2017

Wkład autorów

- (1) Współautor programu realizacji badań, autor projektu matryc i ich wykonawca, realizator programu badań, opracowanie wyników i manuskryptu
- (2) Autor koncepcji, założeń oraz metod realizacji przeprowadzonych badań, opracowanie i analiza wyników, opracowanie manuskryptu

Streszczenie

W pracy zaprezentowano wyniki badań efektów wyciskania będących podstawą fizycznego modelowania płynięcia w warunkach procesu KOBO pozwalających na określenie wpływu rodzaju matryc o różnych parametrach geometrycznych na schemat plastycznego płynięcia metalu. Do prób wyciskania użyto wlewków składających się z naprzemiennie ułożonych krążków stopu aluminium 7075 T6 oraz miedzi (M1E). Proces przeprowadzono z użyciem matryc o różnej geometrii części czołowej bez podgrzewania wsadu i elementów prasy. Warstwy miedzi posłużyły jako markery do identyfikacji schematu płynięcia i strefy uplastycznienia a jednocześnie wykazały możliwość uzyskania metalicznego materiału kompozytowego Al-Cu. Pobrane z wyrobów próbki oraz piętki po wyciskaniu badano pod kątem analizy makro i mikrostruktury oraz właściwości wytrzymałościowych. Wszystkie próbki, niezależnie od miejsca ich pobrania, charakteryzowały się korzystną, jednorodną, drobnoziarnistą mikrostrukturą w całej objętości wyrobu. Strefa połączenia Al. i Cu ma charakter nierozłączny, pozbawiony wad. Otrzymany materiał kompozytowy posiada bardzo dobre właściwości wytrzymałościowe, zbliżone do właściwości stopu aluminium 7075 T6. Uzyskane wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych wykazały celowość podjęcia zagadnienia modyfikacji cech narzędzi do procesu wyciskania metodą KOBO jako mających bezpośredni wpływ na parametry siłowe procesu oraz charakter plastycznego odkształcenia materiału wsadowego. Wykazano zależność cech mechanicznych i strukturalnych wyrobów wyciskanych metodą KOBO i schematu płynięcia od parametrów procesu oraz siły wyciskania od rodzaju zastosowanej matrycy.

Słowa kluczowe: wyciskanie, wyciskanie KOBO, stopy aluminium

Article info

Received: 6.10.2017

Reviewed: 23.10.2017

Accepted: 15.12.2017

Authors' contribution

- (1) Co-author of the research implementation program, author of the matrix design and their contractor, executor of the research program, preparation of the results and the manuscript

Abstract

The paper presents results of extrusion effects which are the basis of physical flow modeling under conditions of the KOBO process, which allow to determine the influence of the type of dies with different geometrical parameters on the scheme of the plastic flow of the metal. Billets made of alternating slices of 7075 T6 aluminum and copper (M1E) were used as composed initial material for extrusion. The process was performed using dies of different face geometry, without heating the billets and press parts. Copper layers have been used as markers for the identification of flow patterns and plastic zone while at the same time demonstrating the possibility to obtain a metallic composite material Al-Cu. Specimens from extruded products as well as butts were tested for macro and microstructure analysis and mechanical properties. All specimens, regardless of which products part they were collected, were characterized by favorable, homogeneous fine-grained microstructure throughout the volume of the product. Connection zone between Al and Cu is inseparable, devoid of defects. Obtained

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 17 743 20 13; e-mail: m.zwolak@prz.edu.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 17 743 20 13; e-mail: m.zwolak@prz.edu.pl

(2) *Author of the concept, assumptions and methods of carrying out the research, elaboration and analysis of the results, preparation of the manuscript*

composite material has very good strength, similar to that of the 7075 T6 aluminum alloy. The obtained results of the experimental work indicate goal of modification of the features of tools for the KOBO extrusion process as having a direct influence on the process parameters and the plastic deformation of the billet. The mechanical and structural characteristics of the KOBO extruded products, the flow scheme under various conditions of the process parameters and the extrusion force depended on the type of dies have been presented.

Keywords: *extrusion, KOBO extrusion, aluminum alloys*

1. WPROWADZENIE

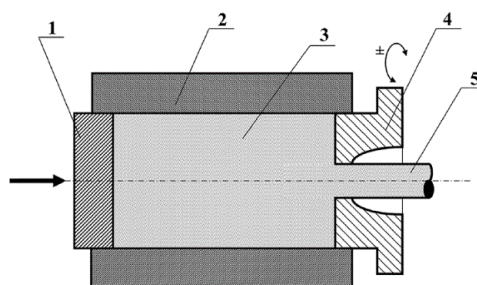
Metoda KOBO [1] jest niekonwencjonalną metodą wyciskania materiałów metalicznych wykorzystującą zjawisko zmiany drogi odkształcenia plastycznego poprzez wprowadzenie narzędzia (matrycy) w cykliczne oscylacje (wokół własnej osi) o zadany kąt i z zadaną częstotliwością (rys. 1). Metoda może być zaklasyfikowana jako metoda SPD jednak w odróżnieniu do większości metod tej grupy, które mają na celu jedynie zmianę właściwości materiału poprzez rozdrobnienie ziarna, pozwala również na kształtowanie wyrobów o żądanej geometrii, tak jak w konwencjonalnych procesach wyciskania. Głównymi zaletami metody KOBO jest znaczne zmniejszenie pracy odkształcenia, a tym samym obniżenie siły wyciskania oraz możliwość realizacji procesu bez podgrzewania wstępnego wstępu oraz narzędzi, przy możliwości zadania dużego odkształcenia [3].

Metoda KOBO jest efektywną, niskoenergetyczną metodą również recyklingu wiórów po obróbkowych [2] zarówno ze stopów metali lekkich takich jak aluminium czy magnez, jak i ze stopów materiałów trudno odkształcalnych, przykładowo tytanu [5].

1. INTRODUCTION

The KOBO method [1] is an unconventional method of metallic materials extrusion using the phenomenon of changing the path of plastic deformation by introducing a tool (die) into cyclic oscillations (around its axis) by a given angle and at a predetermined frequency (Fig. 1). The method can be classified as an SPD method, but unlike most of the methods of this group, which only aim to change the material's properties by grain fragmentation, it also allows the shaping of the desired geometry products, as in conventional extrusion processes. The main advantages of the KOBO method are the considerable reduction in deformation work and thus the reduction of the extrusion force, and the possibility of implementing the process without preheating the billet and tools, with the possibility of high deformation [3].

The KOBO method is an efficient, low-energetic method for the recycling of chips [2] both from light metal alloys such as aluminum or magnesium, and from alloys of hardly deformable materials such as titanium [5].



Rys. 1. Schemat wyciskania metodą KOBO, 1 – stempel, 2 tuleja recypienta, 3 – materiał wsadowy, 4 – matryca cyklicznie skręcana, 5 – wyrób [2]

Fig. 1. KOBO extrusion pattern, 1 – ram, 2 – container sleeve, 3 – billet 4 – cyclic rotating die, 5 – extruded product [2]

Aby zrealizować technologicznie główne założenie opracowanej metody, którym jest cykliczne oscylacje matrycy, konstrukcja prasy KOBO (rys. 2) różni się od konstrukcji prasy konwencjonalnej.

In order to realize the main principle of the developed method, which is cyclic oscillation of the die, the construction of the KOBO press (Fig. 2) differs from conventional press construction.

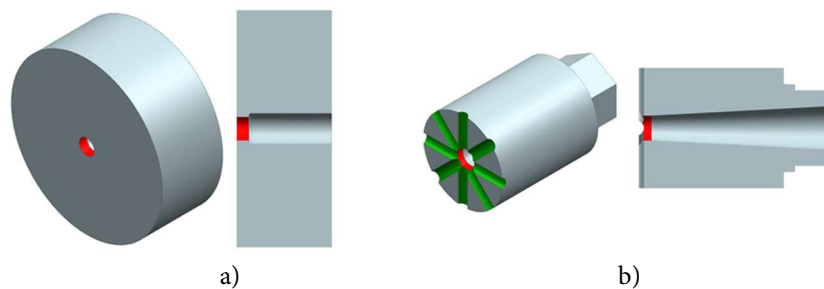


Rys. 2. Prasa KOBO 2.5 MN

Fig. 2. 2.5 MN KOBO press

Z zastosowaniem układu mechanicznego realizującego cykliczne ruchy narzędzia, spowodowało zmianę konstrukcji matrycy (rys. 3b).

Using a mechanical system that performs cyclic tool movements, the die structure has been changed (Fig. 3b).



Rys. 3. Matryca do wyciskania: a) konwencjonalnego, b) metodą KOBO

Fig 3. Extrusion die: a) conventional, b) KOBO method

W literaturze [3, 4] opisano mechanizm płynięcia materiału w procesie wyciskania KOBO jako radialny z koncentracją uplastycznienia w strefie zlokalizowanej bezpośrednio przy czole matrycy. Brak jednak badań dotyczących bezpośredniego wpływu cech geometrycznych narzędzia, a w szczególności czoła matrycy, na finalny efekt wyciskania w procesie KOBO w tym efekt uplastycznienia i schemat płynięcia materiału czy zmian parametrów siłowych. Zatem realizacja badań w tym zakresie jest uzasadniona.

Celem przedstawionych w niniejszej pracy badań jest zatem określenie wpływu cech geometrycznych matryc do wyciskania KOBO o różnej geometrii na charakter plastycznego płynięcia materiału wsadowego. Wiąże się to z określeniem schematu płynięcia, cech charakterystycz-

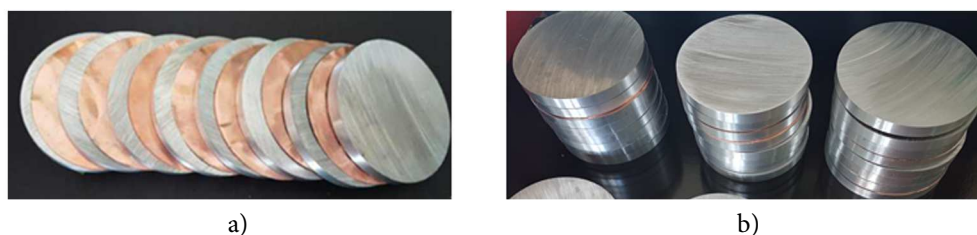
In literature [3, 4] the mechanism of material flow in the KOBO extrusion process is described as radial with concentration of plasticization in the zone located directly at the face of the die. There is, however, no study on the direct influence of the geometrical features of the tool and in particular on the face of the die for the final extrusion effect in the KOBO process including the effect of plasticization and the flow pattern of the material or changes in the force parameters. Therefore, research in this field is justified.

The aim of this paper is to determine the influence of geometric features of KOBO extrusion dies with different geometries on the nature of plastic flow of the billet material. This involves defining the flow pattern, the characteristics

nych strefy uplastycznienia, które są odmienne od występujących w konwencjonalnych procesach wyciskania; mają decydujący wpływ na finalne cechy strukturalne, mechaniczne i geometryczne wyciskanego wyrobu oraz poziom siły wyciskania.

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

W celu identyfikacji charakteru plastycznego płynięcia materiału procesie KOBO do prób wyciskania przygotowano wlewki składające się z naprzemiennie ułożonych krążków stopu aluminium 7075 T6 o grubości 5 mm oraz folii miedzianej (M1E) o grubości 0,1 mm (rys. 4). Krążki ze stopu aluminium po cięciu z zastosowaniem cieczy chłodząco-smarującej oczyszczono przy użyciu zmywacza na bazie alkoholu oraz osuszono. Krążki z blachy miedzianej bezpośrednio przez złożeniem materiałów w pakiety zanurzano w kwasie azotowym oraz osuszano celem usunięcia warstwy powierzchniowej.



Rys. 4. Wlewki przygotowane do przeprowadzenia badań a) sekwencja materiałów składowych wlewka, b) wlewki przygotowane do wyciskania

Fig. 4 Billets prepared for experiment a) a sequence of billet components, b) billets prepared for extrusion

Średnica wyjściowa 60 mm przygotowanych wlewków odpowiadała średnicy tulei pojemnika prasy.

Celem uzyskania prasówki w formie pręta okrągłego o średnicy 10 mm, co odpowiada współczynnikowi wyciskania $\lambda = 36$, zaprojektowano i wykonano trzy typy matryc. Każdy typ matryc cechowały paski kalibrujące o jednakowej długości, a pozostałe cechy geometryczne były różne takie, jak: ilość, głębokość i szerokość rowków promieniowych, ich rozmieszczenie, ewentualne występowanie innych modyfikacji czoła matrycy. W każdym jednak wariantcie matrycy starano się zachować stałość np. pola powierz-

of the plasticization zone that are different from those found in conventional extrusion processes. They have a decisive influence on the final structural, mechanical and geometrical characteristics of the extruded product and the level of extrusion force.

2. EXPERIMENTAL WORK

In order to identify the plastic flow character of the KOBO extrusion process, an billet consisting of alternating 5 mm aluminum alloy 7075 T6 discs and 0.1 mm thick copper (M1E) film (Fig 4) was prepared. The aluminum alloy discs after cutting using a coolant were cleaned using an alcohol-based remover and dried. Discs of copper sheet directly before assembling the materials in packages were immersed in nitric acid and dried to remove the surface layer.

The diameter of 60 mm of the prepared billets corresponded to the diameter of the press container.

In order to obtain a round bar of 10 mm diameter, which corresponds to the extrusion ratio $\lambda = 36$, three types of dies were designed and manufactured. Each type of die was characterized by bearing surface of equal length and other geometric features were different, such as: amount, depth and width of radial grooves, their placement and other modifications of the die face. However, in each type of the die, the equality of the surface area of the grooves was main-

chni wewnętrznej rowków czołowych. Wszystkie narzędzia wykonano ze stopu Inconel 718. Dla porównania schematów płynięcia w warunkach wyciskania z użyciem matryc o różnej geometrii do realizacji wszystkich prób zastosowano jednakowe wyselekcjonowane parametry technologiczne procesu: prędkość przemieszczenia stempla prasy 0,1 mm/s, częstotliwość oscylacji matrycy 6 Hz, kąt wychylenia matrycy od pozycji zerowej $\pm 6^\circ$. Prasówka była chłodzona bieżącą wodą w temperaturze pokojowej na wybiegu prasy. W trakcie realizacji badań rejestrowano siłę wyciskania. Zastosowanie matryc skutkowało różnymi efektami wyciskania zarówno parametrami siłowymi procesu, jak i właściwościami mechanicznymi i strukturalnymi wyrobu.

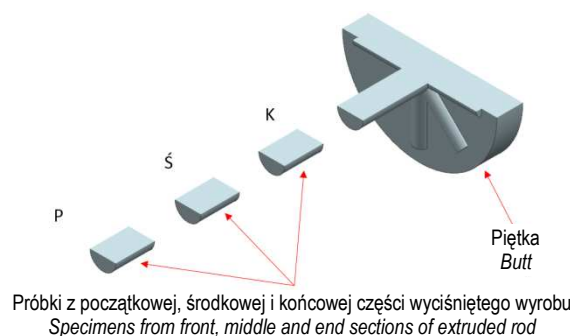
Analiza struktury wewnętrznej wyciskanego wyrobu oraz identyfikacja charakteru plastycznego płynięcia z zastosowaniem różnorodnych warstw wlewka pozwoliły na adekwatną ocenę mechanicznego zachowania się metalu w warunkach wyciskania KOBO.

Próbki do badań metalograficznych pobrano z początku, środka otrzymanych wyrobów. Pierwsza próbka (fragment początkowy) została pobrana z obszaru wyrobu, dla którego przebieg procesu został ustabilizowany. Obserwacjom mikroskopowym poddano przekroje poprzeczne i wzdłużne wybranych odcinków prętów oraz piętki – zachowaną część wlewka i wyrobu z ostatniego etapu wyciskania, pozostałe z każdej z prób wyciskania w przekroju wzdłużnym w osi wyrobu (rys. 5).

tained. All tools were made of Inconel 718 alloy. For comparison of flow schemes using different dies, the same process parameters were selected: 0.1 mm/s ram displacement, 6 Hz oscillation frequency, $\pm 6^\circ$ swing angle from starting position. The press was cooled with water at room temperature on the exit of the press. During the extrusion the extrusion force was recorded. The use of dies resulted in different extraneous effects of both the force parameters of the process as well as the mechanical and structural properties of the product.

Analysis of the internal structure of the extruded product and the identification of the plastic flow character using different layers of the billet allowed for an adequate assessment of the mechanical behavior of the metal under the conditions of KOBO extrusion.

Samples for metallographic tests were taken from the front, middle and end part of the obtained products. The first sample (initial fragment) was taken from the product area for which the process was already stabilized. The axial and longitudinal sections of the selected rod sections and the butt – retained part of the billet and the product of the last extrusion stage, remaining from each of the extrusion tests in the longitudinal section in the product axis (Fig. 5) were subjected to microscopic observations.

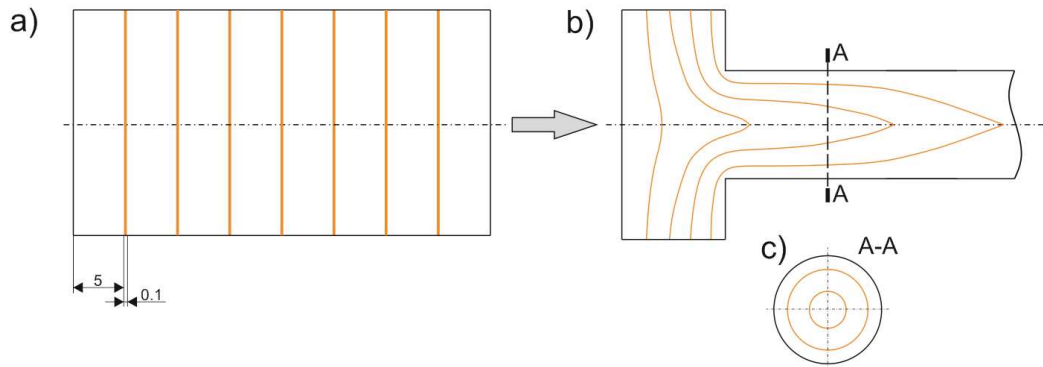


Rys. 5. Metodyka pobierania próbek z prasówki do identyfikacji płynięcia plastycznego, mikrostruktury oraz własności wytrzymałościowych

Fig. 5 Method of preparing specimens from the extruded product for identification of plastic flow, microstructure and strength properties

Badania schematu płynięcia oparto o analizę warstw charakterystycznych wlewka – znaczników sposobu płynięcia (rys. 6).

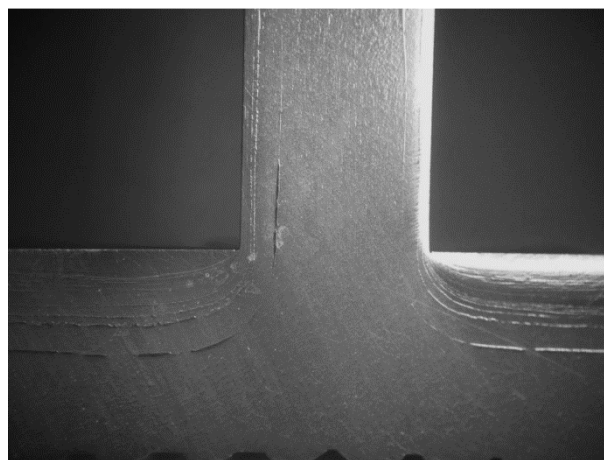
The study of the flow scheme was based on the analysis of the characteristic layers of the billet – the markers of the flow pattern (Fig. 6).



Rys. 6. Schemat analizy linii charakterystycznych – warstw markerowych, a) materiał wsadowy – krążki aluminium i folii miedzianej ułożone naprzemiennie, b) przekrój wzdłużny piętki i wyrobu, c) przekrój poprzeczny wyrobu
Fig. 6. Diagram of analysis of characteristic lines – marker layers, a) billet material – aluminum and copper foil slices stacked alternately, b) longitudinal section of the butt and the product, c) cross section of the product

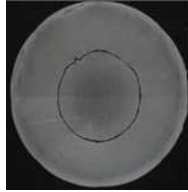

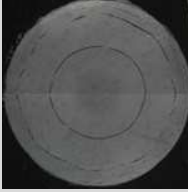

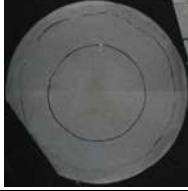
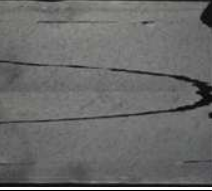
Dokonanie analizy efektów fizycznego modelowania w procesie KOBO oparto o wyniki identyfikujące rozmieszczenia linii i stref charakterystycznych w przekrojach poprzecznych i podłużnych odcinków pręta oraz piętki (materiału wsadowego z końca wyciskania), obejmującego część wlewka i wyrobu (rys. 7) próbek pobranych zgodnie ze schematem na rys. 5, a przykładowo przedstawionych w tab. 1.

The analysis of the physical modeling effects in the KOBO process is based on the results identifying the distribution of lines and characteristic zones in cross sections and longitudinal sections of the rod and butt (input material from the end of the extrusion), including part of the billet and product (Fig. 7) and, for example, shown in Tab. 1.



Rys. 7. Makrostruktura piętki – końcówki materiału wyciskanego – uzyskanego w procesie KOBO
Fig. 7. Macrostructure of the butt -- the ends of extruded material – obtained in the KOBO process

Tab. 1. Przekroje poprzeczne i wzdłużne wyrobów uzyskanych metodą KOBO
 Tab. 1 Axial cross-sections and longitudinal sections of KOBO products

	Matryca – Typ I Die – type I	
	Przekrój poprzeczny Axial cross-section	Przekrój wzdłużny Longitudinal section
Początek wyrobu Product front part		
Środek wyrobu Product middle part		
Koniec wyrobu Product end part		

Observacje makrostruktury wykazały, że niezależnie od etapu procesu wyciskania widoczny jest obszar zwiększonego odkształcenia, usytuowany w osi. Porównanie makrostruktury stopu tego samego pręta, po poszczególnych etapach wyciskania wskazuje, że największe odkształcenie występuje w początkowym etapie wyciskania, w środkowym jest nieco mniejsze, a zdecydowanie inne odkształcenia występują w końcowym etapie wyciskania. Ponadto, w obszarach przypowierzchniowych ujawnione zostały linie płynięcia, z charakterystycznymi miejscowymi zaburzeniami, o różnym odkształceniu, np. najwyraźniej widoczne są po początkowym etapie wyciskania. W każdej z badanych próbek, niezależnie od etapu wyciskania, nie zaobserwowano obecności jakichkolwiek wad typu pęknięcia czy rozwarstwienia.

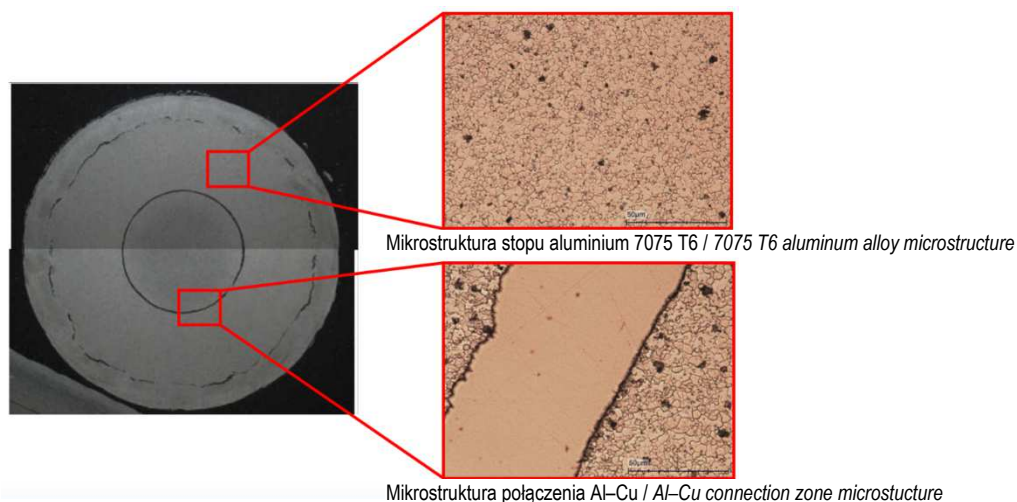
Observacje mikrostruktury (rys. 8) wykazały, że we wszystkich badanych próbkach, w obszarze granicy rozdziału miedź – stop aluminium brak jest jakichkolwiek wad, a mikrostruktura w strefie granicy rozdziału faz wykazuje połączenie obu metali. Ujawniono pasmo-wość mikrostruktury widoczną w przekrojach

Macrostructure observations have shown that regardless of the stage of the extrusion process, an area of increased deformation is visible in the axis. The comparison of the alloy macrostructure of the same bar after the individual extrusion stages indicates that the largest deformation occurs in the initial extrusion stage, in the middle is slightly smaller, and definitely other deformations occur in the final extrusion stage. In addition, in the area close to the surface, flow lines with characteristic local disturbances of different deformation are apparent, for example, apparently after the initial extrusion stage. Regardless of the extrusion stage, no cracks and no delamination were observed.

Observations of the microstructure (Fig. 8) showed that in all samples tested, there was no defect in the copper-aluminum alloy boundary and the microstructure in the zone of the phase separation showed the combination of the two metals. The banding of the microstructure is visible in longitudinal sections. Microstructure of the alloy is fine-grained (average grain diame-

wzdłużnych. Mikrostruktura stopu jest drobnoziarnista (średnia średnica ziarna 1–4 μm), a stanowią ją wydzielenia międzymetalicznych faz umacniających w osnowie roztworu stałego aluminium.

ter 1–4 μm), and it consists of the intermetallic reinforcing phases in the matrix of the solid aluminum solution.



Rys. 8. Mikrostruktura w przekroju poprzecznym prasówki 7075/Cu

Fig. 8. Microstructure in cross section of 7075 / Cu extruded rod

Makro- i mikrostruktura materiału złożonego z Al7075 i Cu charakteryzuje się dużym stopniem jednorodności wzdłuż całego przekroju. W makro- i mikrostrukturze prętów stwierdzono w materiale występowanie znaczących różnic pomiędzy poszczególnymi etapami wyciskania.

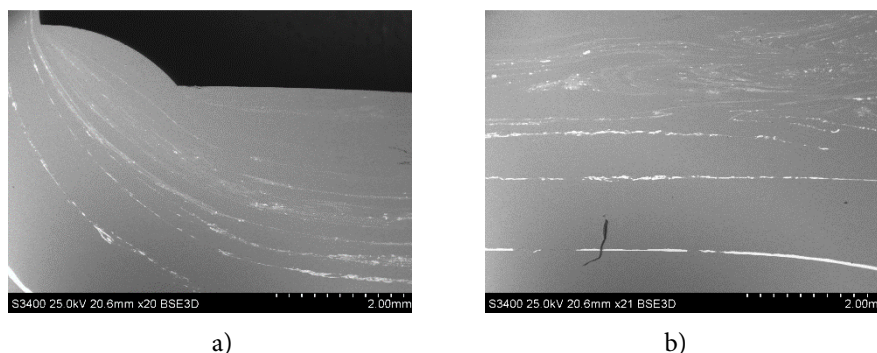
Badanie makroskopowe piętek (rys.9) uwiocznio strefę intensywnego uplastycznienia materiału w obszarze położonym w bezpośrednim sąsiedztwie czoła matrycy, co jest charakterystyczne dla procesu KOBO i odróżnia go od procesu konwencjonalnego. Kolejne warstwy miedzi – markera symulującego linie płynięcia – wykazują najbardziej intensywne odkształcenie w pobliżu otworu matrycy, rozmycie i wymieszanie warstwy markera wynika z ruchu oscylacyjnego i częstości oscylacji matrycy.

Widoczne również są niewielkie strefy martwe na dużej średnicy wsadu, co wynika z uwarunkowań technicznych. Matryca osadzona jest w nieruchomym pierścieniu, który jest dociskany przez pojemnik.

The macro- and microstructure of the material composed of 7075 T6 Al and Cu is characterized by a high homogeneity along the entire cross section. In the macro and microstructure of the bars, significant differences were found in the material between the different extrusion stages.

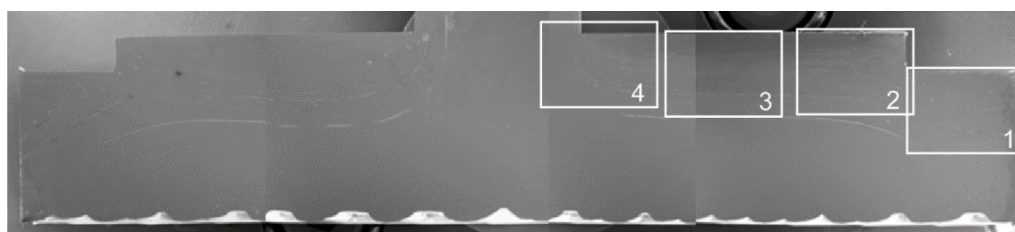
Macroscopic examination of the butt (Fig. 9) revealed the area of intense plasticization of the material in the immediate vicinity of the die face, which is characteristic of the KOBO process and distinguishes it from the conventional process. Further layers of copper – the flow markers – show the most intense deformation near the die opening, blurring and blending of the marker layer is due to the oscillating motion of the die.

Small dead zones are also visible on the large diameter of the extruded material, which is due to technical conditions. The die is mounted in a fixed ring that is pressed against the container.



Rys. 9. Makrostruktura piętki po wyciskaniu metodą KOBO – a); widoczna strefa intensywnego uplastycznienia materiału w obszarze położonym w pobliżu czoła matrycy – b)

Fig. 9. Macrostructure of the butt after extrusion by the KOBO method – a); zone of intense plasticization of the material in the area near the die face – b)



Rys. 10. Makrostruktura piętki, matryca typ I

Fig. 10. Butt macrostructure, die type I

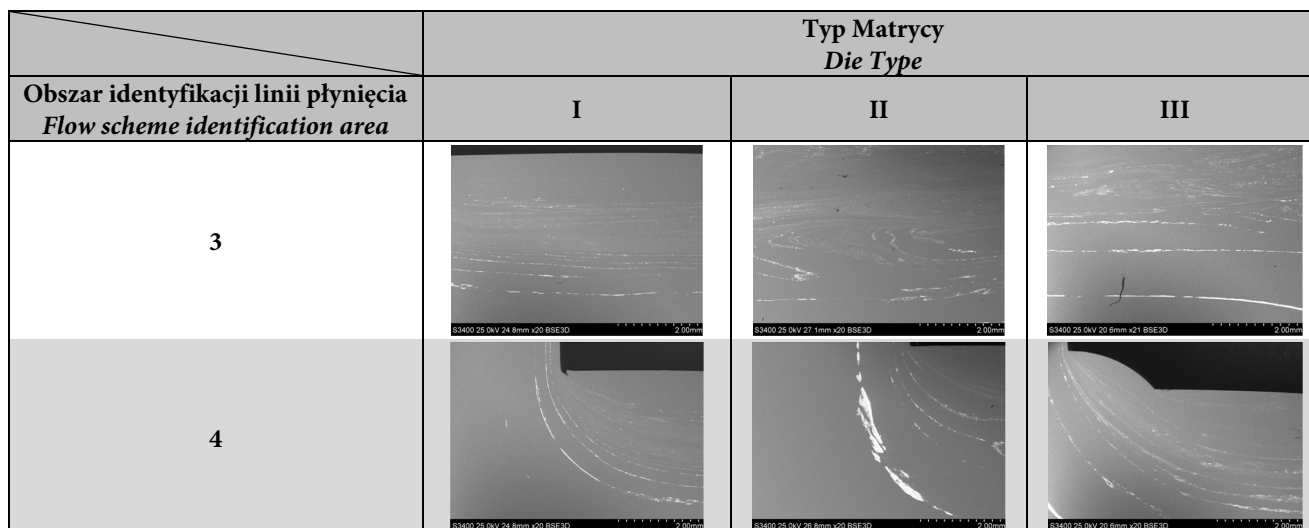
Makrostruktura charakterystycznych obszarów ujawniających schemat plastycznego płynięcia przedstawiono na tab. 2. Analiza porównawcza tych odpowiadających sobie stref wykazuje istotną różnicę schematu w zależności od geometrii matrycy.

The macrostructure of the characteristic areas revealing the plastic scheme diagram is shown in Tab. 2. Comparative analysis of these corresponding zones shows a significant difference in pattern depending on the geometry of the matrix.

Tab. 2. Makrostruktura obszarów piętki wg schematu na rys. 10 (pow.20x) dla wykorzystanych typów matryc

Tab. 2. Macrostructure of butt areas according to Fig. 10 (magnified 20x) for the used die types

Obszar identyfikacji linii płynięcia <i>Flow scheme identification area</i>	Typ Matrycy <i>Die Type</i>		
	I	II	III
1			
2			



Występowanie minimalnej strefy martwej lub jej brak, występowanie stref płynięcia laminarnego i nielaminarnego we fragmentach strefy uplastycznienia (zawierania linii markerowych) umożliwia ocenę jednorodności odkształcenia w obszarze strefy uplastycznienia i w wyrobie wyciskanym w zależności od geometrii matrycy.

Najbardziej korzystny schemat płynięcia występuje przy zastosowaniu matrycy typu III co potwierdzają obrazy obszaru 3 i 4 oraz najmniejsza zarejestrowana siła wyciskania (Tab. 3).

Occurrence of the minimum dead zone or its absence, laminar and non-laminar flow zones in the plastic zone (swirls of the marker lines), allows evaluation of uniformity of deformation in the area of the plasticization zone and in the extruded product depending on the geometry of the die.

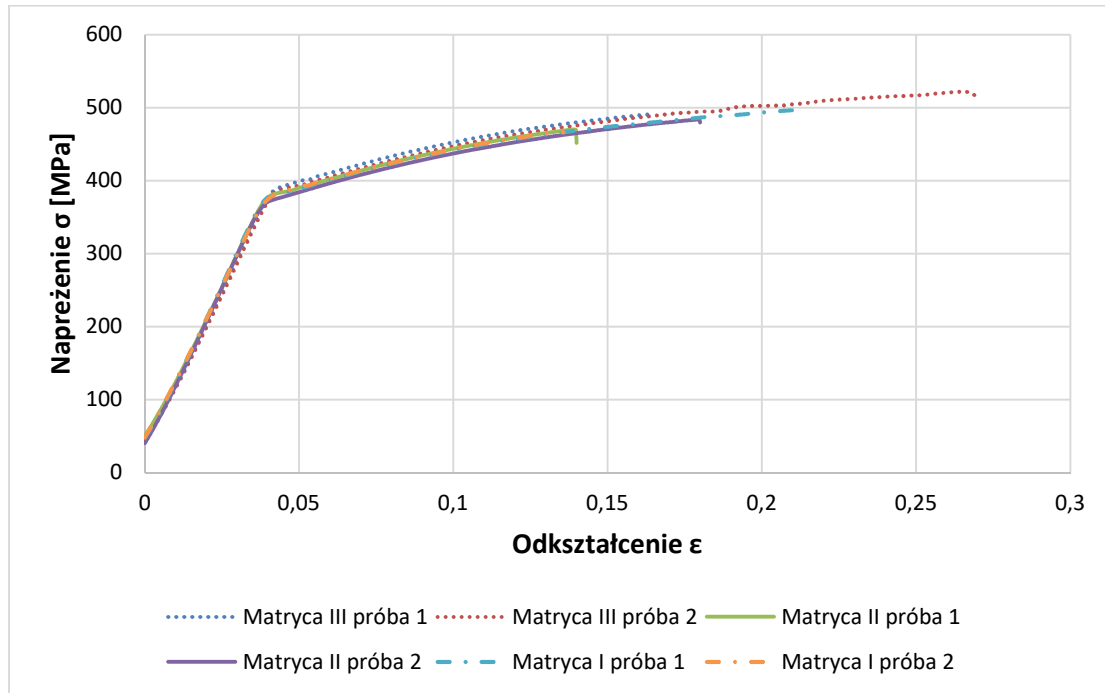
The most preferred flow pattern is with a type III die, which confirms images of areas 3 and 4, and the smallest recorded extrusion force (Tab. 3).

Tab. 3. Zarejestrowane siły wyciskania w procesie KOBO z użyciem matryc o różnej geometrii
Tab. 3. Registered extrusion forces in the KOBO process using matrices of different geometries

Typ matrycy <i>Die type</i>	Maksymalna zarejestrowana siła wyciskania <i>Max. recorded extrusion force</i>
I	2020 kN
II	1830 kN
III	1670 kN

Badania właściwości mechanicznych wyciskanych wyrobów i odniesione do cech składników oraz zastosowanej określonej geometrii matrycy typu I, II i III wykazują niewielkie zróżnicowanie zarówno modułu Younga, jak i umownej granicy plastyczności oraz wytrzymałości na rozciąganie, z uwagi na wyciskany taki sam materiał Al7075/Cu, przy tych samych parametrach technologicznych procesu KOBO (rys. 11, tab. 4).

The mechanical properties of the extruded specimens according to the specific die geometry of the I, II and III types show little difference in both the Young's modulus and the contractual yield strength and tensile strength due to the same Al7075/Cu extruded material. KOBO process parameters (Fig. 11, Tab. 4).



Rys. 11. Wykresy rozciągania próbek z kompozytu Al-Cu

Fig. 11. Al-Cu composite uniaxial tensile test results

Tab. 4. Wyniki prób rozciągania próbek

Tab. 4. Results of the uniaxial tensile test

Właściwości mechaniczne / <i>Mechanical properties</i> Rodzaj matrycy / <i>Die type</i>	E GPa	R _{0,2} MPa	R _m MPa
Pręt wyciskany z użyciem matrycy, typ III, próba 1 <i>Extruded rod, die type III, test 1</i>	73	387	491
Pręt wyciskany z użyciem matrycy, typ III, próba 2 <i>Extruded rod, die type III, test 2</i>	72	390	522
Pręt wyciskany z użyciem matrycy, typ II, próba 1 <i>Extruded rod, die type II, test 1</i>	73	383	470
Pręt wyciskany z użyciem matrycy, typ II, próba 2 <i>Extruded rod, die type II, test 2</i>	70	373	483
Pręt wyciskany z użyciem matrycy, typ I, próba 1 <i>Extruded rod, die type I, test 1</i>	73	378	497
Pręt wyciskany z użyciem matrycy, typ I, próba 2 <i>Extruded rod, die type I, test 2</i>	73	381	470
Stop Al 7075 T6 <i>7075 T6 Al alloy</i>	72	460	520
Miedź M1E <i>Copper M1E</i>	110	33	210

Przedstawione wyniki badań wykazują celowość poszukiwania rozwiązań konstrukcyjnych matryc dostosowanych do wyciskania danego rodzaju materiałów metodą KOBO.

The presented results show the purpose of searching for design solutions of dies adapted to the extrusion of a given type of materials by the KOBO method.

3. PODSUMOWANIE

Analiza struktury wewnętrznej wyciskanego wyrobu oraz identyfikacja charakteru plastycznego płynięcia z zastosowaniem wlewka o narzemiennych warstwach głównego materiału wlewka (stop aluminium 7075) i warstw rozdzielających markerowych (Cu) pozwoliły na ocenę mechanicznego zachowania się metalu w procesie wyciskania KOBO oraz na fizyczne modelowanie płynięcia materiału w tym procesie.

Uzyskanie bardzo dobrego połączenia warstw w wyniku realizacji procesu daje możliwość uzyskiwania tą metodą materiałów kompozytowych o różnej aranżacji geometrycznej składników.

Cechy wyciskania metodą KOBO z zastosowaniem matryc o różnej geometrii wykazały istotne różnice w schemacie płynięcia w zależności od rodzaju matrycy. Wykazano zależność pomiędzy typem zastosowanej matrycy a siłą wyciskania. Spośród badanych matryc najbardziej korzystny schemat płynięcia uzyskano przy użyciu matrycy typu III, co potwierdza najniższa siła wyciskania.

Uzasadnione jest poszukiwanie rozwiązań konstrukcyjnych matryc do wyciskania w procesie KOBO w odniesieniu do różnego rodzaju materiałów metalicznych, co pozwala na bardzo znaczne obniżenie maksymalnej siły wyciskania w stosunku do klasycznego wyciskania oraz pozwala na uzyskiwanie wyrobów o jednorodnych właściwościach na całej długości wyciskanego wyrobu.

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.

3. CONCLUSIONS

Analysis of the structure of the extruded product and the identification of the plastic flow character using the billet with alternating layers of the main material (aluminum alloy 7075) and Cu foil allowed to evaluate the mechanical behavior of the metal in the extrusion process and to physically model the flow of material in this process.

Obtaining a very good bonding of layers as a result of the process gives the possibility of obtaining composite materials with different geometrical arrangement of the components.

The KOBO extrusion using different die geometries showed significant differences in the flow scheme depending on the type of die. The relationship between the used type of die and the force of extrusion was demonstrated. From the dies tested, the most preferred flow pattern was obtained using a Type III die, which confirms the lowest extrusion force.

It is reasonable to search for die design solutions for KOBO process in relation to various types of metallic materials, which allows for a very significant reduction of the maximum extrusion force in relation to classical extrusion and allows to obtain products with homogeneous properties throughout the volume of extruded product.

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.

LITERATURA

- [1] Korbel A., W. Bochniak. *Method of plastic forming of materials*. U.S. patent 5.737.959 (1998), European Patent 0.711.210 (2000).
- [2] Korbel A., W. Bochniak, R. Śliwa, P. Ostachowski, M. Łagoda, Z. Kusion, B. Trzebuniak. 2016. „Nisko-temperaturowa konsolidacja wiórów z trudno-kształcalnych stopów aluminium”. *Obróbka Plastyczna Metali XXVII* (2): 133–152.
- [3] Bochniak W. 2009. *Teoretyczne i praktyczne aspekty plastycznego kształtowania metali, metoda KoBo*. Kraków: Wydawnictwa AGH.
- [4] Maciejewski J., Z. Mróz. 2007. „Analiza procesu wyciskania metali wspieranego deformacją cykliczną”. *Rudy Metale* 52 (11): 668–677.
- [5] Topolski K., W. Bochniak, M. Łagoda, P. Ostachowski. 2017. „Structure and properties of titanium produced by new method of chip recycling”. *Journal of Materials Processing Technology* 248: 80–91.

REFERENCES

- [1] Korbel A., W. Bochniak. *Method of plastic forming of materials*. U.S. patent 5.737.959 (1998), European Patent 0.711.210 (2000).
- [2] Korbel A., W. Bochniak, R. Śliwa, P. Ostachowski, M. Łagoda, Z. Kusion, B. Trzebuniak. 2016. „Low-temperature consolidation of machining chips from hardily-deformable aluminum alloys”. *Obróbka Plastyczna Metali XXVII* (2): 133–152.
- [3] Bochniak W. 2009. *Teoretyczne i praktyczne aspekty plastycznego kształtowania metali, metoda KoBo*. Kraków: Wydawnictwa AGH.
- [4] Maciejewski J., Z. Mróz. 2007. „Analiza procesu wyciskania metali wspieranego deformacją cykliczną”. *Rudy Metale* 52 (11): 668–677.
- [5] Topolski K., W. Bochniak, M. Łagoda, P. Ostachowski. 2017. „Structure and properties of titanium produced by new method of chip recycling”. *Journal of Materials Processing Technology* 248: 80–91.

