



Mikrostruktura i właściwości mechaniczne eutektycznego stopu Al-33%Cu po zastosowaniu odkształcania metodą KoBo

Microstructure and mechanical properties of Al-33%Cu eutectic alloy after KoBo deformation

(1) Agata Brzezińska^{*1}, (2) Tomasz Mikuszewski¹, (3) Joanna Sobota², (4) Kinga Rodak¹

¹ Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Poland

² Instytut Metali Nieżelaznych, ul. Generała Józefa Sowińskiego 5, 44-121 Gliwice, Poland

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 27.02.2018

Recenzja: 15.03.2018

Akceptacja: 25.06.2018

Wkład autorów

- (1) Opracowanie literaturowe, założenia pracy, analiza i interpretacja wyników badań, edycja manuskryptu
- (2) Metodyka badań (przygotowanie odlewów), analiza wyników badań
- (3) Metodyka badań z wykorzystaniem KoBo, próby odkształcania, analiza wyników badań
- (4) Koncepcja, analiza i interpretacja wyników badań

Streszczenie

Przedmiotem badań mikrostruktury i właściwości mechanicznych był eutektyczny stop Al-33%Cu poddany odkształcaniu metodą KoBo. Stop bezpośrednio po odlaniu został przetoczony do średnicy 49 mm, a następnie wyciskany metodą KoBo do średnicy 9 mm. Proces prowadzono przy kącie obrotu matrycy 8°. Badania mikrostruktury wykonano na mikroskopie świetlnym Olympus GX71. Obserwacji mikrostruktury cienkich folii dokonano na skaningowo-transmisyjnym mikroskopie elektronowym (STEM) Hitachi HD-2300A z działem typu FEG, który jest wyposażony w detektor EDS, umożliwiającą analizę składu chemicznego. Analizy przełomów dokonano na skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) Hitachi S-340N. Próbę ściskania przeprowadzono na maszynie Zwick/Roell Z100. Próba została wykonana w temperaturze otoczenia na próbkach w kształcie walców o średnicy 6 mm i wysokości 9 mm, zastosowano siłę nacisku 100 kN. Do wykonania pomiarów twardości użyto mikrotwardościomierza Future-Tech FM-700. Badano twardość stopów pod obciążeniem 0,1 kg. Pomiarzy przewodności elektrycznej właściwej przeprowadzono na urządzeniu SIGMATEST 2.096 firmy FOERSTER. Udowodniono, że zastosowana metoda KoBo pozwala na fragmentację mikrostruktury badanego stopu, w wyniku czego otrzymuje się fazy o globularnej morfologii. Mimo zastosowanego procesu SPD nie dochodzi do całkowitego ujednorodnienia struktury: obserwuje się zróżnicowaną wielkość faz jako pozostałość po procesie odlewania, a także obserwuje się mikroobszary nieodkształcone. Odkształcenie stopu metodą KoBo przyczynia się do wzrostu właściwości wytrzymałościowych i plastycznych. Proces KoBo może być zastosowany do rozdrabniania struktury stopu o składzie eutektycznym.

Słowa kluczowe: stopy Al-Cu, mikrostruktura, właściwości mechaniczne, SPD, metoda KoBo

Article info

Received: 27.02.2018

Reviewed: 15.03.2018

Accepted: 25.06.2018

Authors' contribution

- (1) Literature study, assumptions, analysis and interpretation of research results, manuscript preparation
- (2) Research methodology (preparation of casting samples), analysis of research results

Abstract

Recent investigations are focused on microstructure and mechanical properties characterization of Al-33%Cu eutectic alloy after application KoBo method. Samples after casting and turning to 49 mm in diameter were extruded to 9 mm in diameter. Process was performed at torsion angle 8°. Microstructural investigations were performed by using light microscopy Olympus GX71, and scanning electron microscopy (SEM) Hitachi S-340N, and scanning transmission electron microscopy (STEM) Hitachi HD-2300A equipped with FEG gun, allowing analysis of chemical composition. Compression tensile strength were performed on the machine Zwick/Roell Z100. The test was carried out at ambient temperature on the Samales in the shape of cylinders with a diameter of 6 mm and a height of 9 mm, a pressure force of 100 kN was applied. The Future-Tech FM-700 machine was used to perform hardness measurements. The hardness of alloys un-

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 32 603 44 15; e-mail: agata.brzezinska@polsl.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 32 603 44 15; e-mail: agata.brzezinska@polsl.pl

- (3) *Research methodology (KoBo method), strain tests, analysis of research results*
- (4) *Concept, analysis and interpretation of research results*

der a load of 0.1 kg was tested. The electrical conductivity measurements were carried out on the SIGMATEST 2.096 FOERSTER device. The results shows that the KoBo method allows to grain fragmentation and improve plastic properties and mechanical properties of alloy. It was observed differentiation in the size of the phases obtained during casting process and additionally, after KoBo deformation were observed non-deformed microareas. After KoBo deformation increase the strength and plastic properties of alloy. KoBo method can be used to fragmentation eutectic alloys Al-33Cu.

Keywords: Al-Cu alloy, microstructure, mechanical properties, SPD, KoBo method

1. WPROWADZENIE

Stopy Al-Cu (seria 2xxx) umacniane wydzieleniowo charakteryzują się dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi w stosunku do ciężaru właściwego, bowiem osiągają one wytrzymałości na rozciąganie R_m w zakresie od 190 MPa do 470 MPa przy ciężarze właściwym ok. 2,7–2,8 g/cm³. Stopy te cechują się dużą sprężystością, gdyż moduł sprężystości E wynosi ok. 72–74 GPa [1–3]. Tym samym właściwości plastyczne tych stopów są adekwatnie niskie. Wydłużenie Z mieści się w zakresie od 10–20% w zależności od zastosowanej obróbki cieplnej [1–3].

Uwzględniając powyższe właściwości, stopy serii 2xxx znalazły szczególne zastosowanie w konstrukcjach samolotowych na takie elementy, jak kadłuby czy skrzydła, od których wymaga się wysokich wartości wytrzymałości względnej. Obrabialne cieplnie stopy Al-Cu znajdują zastosowanie na odpowiedzialne części konstrukcji lotniczych, pracujących maksymalnie w temperaturze 150°C. Ponadto stopy serii 2xxx są stosowane na zbiorniki paliwa oraz belki i wysięgniki konstrukcyjne [3, 4]. Jednak wspomnianą wadą stopów Al-Cu uniemożliwiającą ich stosowanie na szerszą skalę jest niska plastyczność.

Wzrost właściwości wytrzymałościowych, a także możliwość zastosowania tych stopów w wyższych temperaturach (powyżej 150°C) jest możliwy na skutek wzrostu udziału fazy międzymetalicznej w mikrostrukturze [2]. Wzrost udziału fazy międzymetalicznej, następuje wraz ze wzrostem zawartości Cu (powyżej 5% mas.) w Al, tym samym stop podczas krzepnięcia podlega przemianie eutektycznej i jednocześnie staje się materiałem odlewniczym. Poprawa właściwości plastycznych jest szczególnie ważna w kontekście stopów odlewniczych Al-Cu, w tym o strukturze eutektycznej takich, jak np. Al-33%Cu. Wiadomo,

1. INTRODUCTION

Precipitation hardened Al-Cu alloys (series 2xxx) are characterized by good strength properties in relation to specific weight. Ultimate tensile strength UTS of these alloys is in the range from 190 MPa to 470 MPa at a specific weight of approximately about 2,7–2,8 g/cm³. These alloys are characterized by high elasticity, because the modulus of elasticity E is about 72–74 GPa [1–3]. Thus, the plastic properties of these alloys are relatively low. The elongation Z is in the range of 10–20%, depending on the applied heat treatment [1–3].

Taking into account the above properties, alloys of 2xxx series are used in special application in aircraft constructions, for such elements as hulls or wings, from which high values of relative strength are required. Al-Cu alloys after applying heat treatment are used for production of responsible parts of aircraft structures operating at a maximum temperature of 150°C. In addition, alloys of 2xxx series are used for fuel tanks, construction beams and booms [3, 4]. However, as mentioned above, disadvantage of Al-Cu alloys is low ductility. This unfavourable feature of Al-Cu alloys hinders them on wider use. Increase in strength properties, and possibility to use of these alloys at higher temperatures (above 150°C) is possible thanks to the increase of intermetallic phase fraction in the microstructure [2]. The fraction of the intermetallic phase increases with the increase of the Cu content (over 5% by weight) in Al, thus the alloy undergoes an eutectic transformation during solidification and becomes a casting material. The improvement of plastic properties is particularly important in the context of Al-Cu casting alloys, especially with eutectic structure such as Al-33%Cu.

że w przypadku tych stopów właściwości plastyczne są niezadowalające [4–7].

Metale i ich stopy charakteryzujące się ultra-drobnodziarnistą strukturą wykazują wysoką wytrzymałość, lecz niską ciągliwość w porównaniu z materiałami klasycznymi [8, 9]. Fakt ten ogranicza możliwości stosowania stopów o strukturze nano- i ultradrobnodziarnistej na szeroką skalę. Jak donoszą badania naukowe [10–13], zastosowanie wybranych technik SPD może nie tylko spowodować wzrost właściwości mechanicznych ale także poprawić właściwości plastyczne [10, 14, 15].

W literaturze niewiele jest jednak informacji na temat odkształcania odlewniczych stopów Al-Cu technikami SPD. Poruszane są natomiast zagadnienia zastosowania metody ARB (ang. *accumulative roll bonding*) do wytwarzania taśm z wielowarstwowych kompozytów Al/Cu [12]. W literaturze światowej omawia się często zagadnienia analizowania mechanizmów odkształcania bimodalnej mikrostruktury stopów odlewniczych takich, jak: Cu-Sn [16] oraz Al-Cu-Si [5, 7] poddanych statycznej próbie rozciągania czy ściskania. Nieliczne dane literaturowe traktują o problematyce odkształcania metodami SPD odlewniczych stopów aluminium. Przykładem może być stop Al-11%Si odkształcany metodą RD-ECAP (ang. *rotary-die equal-channel angular pressing*) [13] oraz stop Al-33%Cu odkształcany z wykorzystaniem metody ECAP (ang. *equal-channel angular pressing*) [4]. W przypadku stopu Al-11% Si [13] wykazano, że wydłużenie określone ze statycznej próby rozciągania jest 10 razy większe dla próbek odkształcanych metodą RD-ECAP w porównaniu do próbek po odlewaniu. Autorzy wspomnianej pracy wykazali również, że próbki poddane uprzednio odkształcaniu RD-ECAP, podczas statycznej próby rozciągania w temperaturze otoczenia, podlegają poślizgowi po granicach ziarn. Ten mechanizm jest odpowiedzialny za poprawę właściwości plastycznych. W pracy [4] wykazano, że w wyniku odkształcania ECAP widoczne są w mikrostrukturze obszary nieodkształcone świadczące o niejednorodności odkształcenia plastycznego w objętości materiału.

Metoda KoBo jest skutecznym sposobem kształtowania struktury i właściwości materiałów. Istotą tego procesu jest zmiana drogi odkształcenia powodująca zmianę stanu naprężenia, co po-

It is known that plastic properties of these alloys are unsatisfactory [4–7].

Metals and their alloys with ultrafine grain structure show high strength but low ductility in comparison with conventional materials [8, 9]. This fact restricts the possibility of application of these alloys on large-scale. According to ref. [10–13], the application of selected SPD techniques may not only increase mechanical properties, but also improve plastic properties [10, 14, 15].

In literature, is only few information about deformation of cast Al-Cu alloys by SPD techniques. Is discussed problem connected with application of the ARB (accumulative roll bonding) method for production of tapes from multilayer Al/Cu composites [12]. In literature is often discussed the problems connected with deformation mechanism of casting alloys such as Cu-Sn [16] and Al-Cu-Si with bimodal microstructure [5, 7] subjected to static tensile tests or compression tests. Only few data indicate the problem of SPD deformation of aluminium casting alloys. An example can be Al-11%Si alloy after rotary-die equal-channel angular pressing (RD-ECAP) deformation [13] and Al33%Cu alloy after equal-channel angular pressing (ECAP) deformation [4]. In the case of Al-11% Si alloy [13], the elongation determined from the static tensile test was found to be 10 times higher for RD-ECAP deformed specimens than for cast ones. The authors of the study also demonstrated that the material previously deformed by RD-ECAP, during the static tensile test at ambient temperature, undergo to slip mechanism along the grain boundaries. This mechanism is responsible for improving the plastic properties. In the paper [4] it was shown that in the microstructure after SPD deformation are visible undeformed areas indicating non-homogeneity of plastic deformation in the volume of material.

The KoBo is an effective method for the structure and properties formation in materials. The essence of this process is the change of the deformation path causing the change of the stress state. This state cause decrease of the extrusion force [14]. The extrusion force is significantly lower

woduje zmniejszenie siły wyciskania [14]. Siła wyciskania jest znacznie niższa od siły stosowanej podczas konwencjonalnego wyciskania. Siła tarcia jest niewielka i pozostaje na stałym poziomie niezależnie od stopnia zaawansowania procesu. Ważną rolę w tym procesie odgrywa nie tylko prędkość wyciskania, ale także kąt i częstość skręcania [14, 15]. Zastosowanie techniki KoBo do rozdrabniania struktury już nawet w temperaturze otoczenia wywołuje w materiale procesy zdrowienia, a nawet rekrytalizacji, co sprzyja tworzeniu równoosiowej struktury wolnej od dyslokacji. Ten cykliczny proces dużych odkształceń plastycznych generuje podczas deformacji ponadwymiarową koncentrację defektów punktowych [14], co dodatkowo sprzyja procesom odbudowy struktury.

W przedmiotowej literaturze brak jest informacji na temat efektów odkształcania SPD przy wykorzystaniu omawianej metody w odniesieniu do odlewniczych stopów dwufazowych Al-Cu o strukturze eutektycznej, dlatego celem pracy jest analiza mikrostruktury oraz pomiar właściwości mechanicznych i fizycznych stopu Al-Cu po zastosowaniu metody KoBo.

2. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Materiał do badań stanowiły wlewki technicznych stopów aluminium z miedzią – grupy 2xxx o składzie eutektycznym Al-33%Cu. Materiał został stopiony w piecu Leybold-Heraues. Po całkowitym roztopieniu stopu w tyglu, przeprowadzono odlewanie do formy piaskowej o średnicy 50 mm. Po wystudzeniu wlewki wyjmowano, odcinano ich stopę i głowę, a następnie poddawano toczeniu mechanicznemu do średnicy 49 mm i obcinano na długość ok. 100 mm. Na tak przygotowanym materiale dokonano pomiaru twardości, konduktywności elektrycznej oraz wykonano badania makrostruktury (rys. 1). Wykazano, że makrostruktura wlewka obserwowana na przekroju poprzecznym składa się z kryształów równoosiowych. Utworzona równoosiowa struktura zapewnia makroskopową izotropowość i jednorodność składu chemicznego poszczególnych składników.

than the conventional extrusion force. Force friction is low and remains constant regardless of the degree of advancement of the process. An important role in this process, play not only extrusion rate, but also the angle and frequency of rotation. [14,15]. The use of the KoBo technique to grain refinement even at ambient temperature results in recovery and even recrystallization processes. This processes contributes in the creation of an equiaxial grain structure free from dislocation inside. This cyclic process of large plastic deformations generates over-dimensional concentration of point defects during deformations [14], which additionally favors the process of structure reconstruction.

In the literature, there is no information about the effects of SPD using the mentioned method with respect the Al-Cu casting alloys with eutectic structure, therefore the aim of the study is to analyze the microstructure and measure the mechanical and physical properties of Al-Cu alloy after application KoBo method.

2. MATERIAL AND METHODS OF INVESTIGATIONS

For the study ingots of Al-Cu alloys – 2xxx group with eutectic composition of Al-33%Cu were used. The material was melted in the Leybold-Heraues furnace. Alloy after melting in the crucible was cast into a sand mold with a diameter of 50 mm. After cooling the ingots were removed and were cut off foots and heads and then mechanically turned to a diameter of 49 mm and cut to length approximately 100 mm. The hardness and electrical conductivity were measured on the material prepared in such a way and the macrostructure was investigated (Fig. 1). It was shown that the macrostructure of the ingot observed on the cross-section consists of equiaxial crystals. Created equiaxial structure ensure macroscopic isotropy and homogeneity in the chemical composition of the each components.

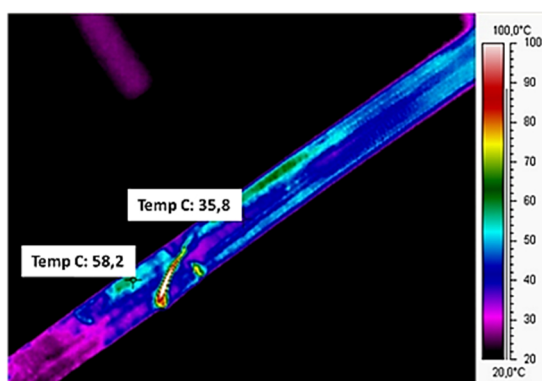


Rys. 1. Makrostruktura stopu Al-33%Cu po odlewaniu – przekrój poprzeczny

Fig. 1. Macrostructure of Al-33% Cu alloy after casting – cross section

Następnie wlewki o średnicy 49 mm poddano wyciskaniu na zmodernizowanym układzie prasy hydraulicznej poziomej KoBo 2,5 MN. Wlewki wyciskano na zimno. Recypient nagrzewano do temperatury 130°C. Próby były prowadzone przy stałej wartości kąta obrotu matrycy, który wynosił 8°. Bezpośrednio po kontakcie tłoczyska z próbką uruchamiano wodne chłodzenie obudowy matrycy. Wewnętrzną powierzchnię recypienta oraz matrycę pokrywano środkiem smarnym z dodatkiem grafitu Lagraf Naftochem. Po około 5–8 minutach od rozpoczęcia wyciskania następował wypływ prasówki przez oczko matrycy. Prędkość wypływu prasówki wynosiła około 10 mm/s. Próbkę wyciskano do średnicy 9 mm. Przykładowy obraz termograficzny wyciskanego wlewka pokazano na rys. 2. Badania wykazały niewielki wzrost temperatury na powierzchni próbek w trakcie odkształcania. Nie można jednak wykluczyć wzrostu temperatury wewnątrz próbki.

Then, ingots with a diameter of 49 mm were pressed on the modernized system of horizontal hydraulic press Kobo 2. 5 MN. The ingots were cold pressed. The recypient was heated to 130°C. The tests were carried out at a constant value of the matrix rotation angle of 8°. Directly after contact the piston rod with the sample, was launch cooling of the matrix casing. The internal surface of the recypient and the matrix were coated with Lagraf Naftochem graphite lubricant. Approximately 5-8 minutes after the starting of extrusion, was an outflow of material by matrix eye. The velocity of the press was around 10 mm/s. The samples were pressed out to a diameter of 9 mm. An example of a thermographic image of an extruded ingot is shown in Fig. 2. Slight increase of temperature on the sample surface during deformation was observed. However, increase of temperature inside the sample cannot be excluded.



Rys.2. Termogram wyciśniętego pręta

Fig. 2. Thermogram of a pressed rod

Podczas prowadzenia próby wyciskania rejestrowano parametry procesowe przy zastosowaniu oprogramowania WykRys. Rejestrację rozpoczynano w momencie rozpoczęcia posuwu tłoczyska z jego pozycji parkingowej do pozycji roboczej. Badania mikrostruktury wykonano na mikroskopie świetlnym Olympus GX71. Obserwacji mikrostruktury cienkich folii dokonano na skaningowo-transmisyjnym mikroskopie elektronowym (STEM) Hitachi HD-2300A z działem typu FEG, który jest wyposażony w detektor EDS, umożliwiającą analizę składu chemicznego. Analizy przełomów dokonano na skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) Hitachi S-340N.

Próbie ściskania przeprowadzono na maszynie Zwick/Roell Z100. Próba została wykonana w temperaturze otoczenia na próbkach w kształcie walców o średnicy 6 mm i wysokości 9 mm, zastosowano siłę nacisku 100 kN. Do wykonania pomiarów twardości użyto mikrotwardościomierza Future-Tech FM-700. Zastosowano metodę Vickersa zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1. Badano twardość stopów pod obciążeniem 0,1 kg. Pomiarów przewodności elektrycznej właściwej przeprowadzono na urządzeniu SIGMATEST 2.096 firmy FOERSTER.

3. WYNIKI BADAŃ

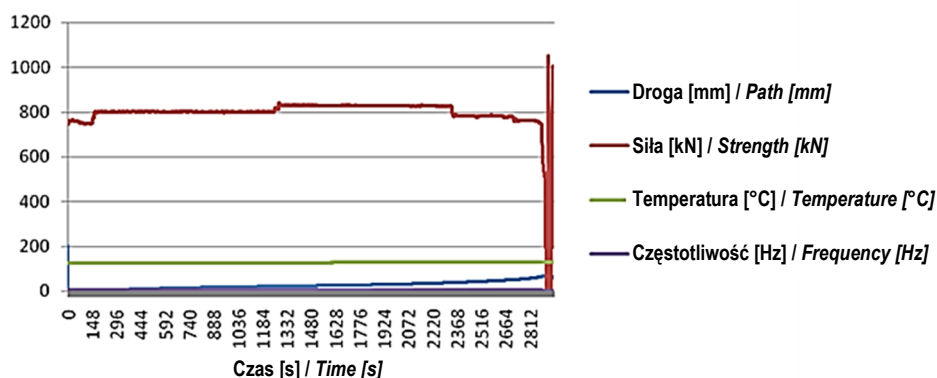
Charakterystyki siłowe procesu wyciskania stopu Al-33%Cu przedstawiono na rys. 3. Na ich podstawie można stwierdzić, że w krótkim czasie dochodzi do ustabilizowania się siły wyciskania, co jest następstwem prowadzenia procesu przy nagrzanym reapiencie.

During the extrusion test, the process parameters were recorded using the WykRys software. Registration began when the piston rod moved from its parking position to its working position. The microstructure was examined on the Olympus GX71 light microscope and the thin foils were observed on the Hitachi HD-2300A scanning transmission electron microscope (STEM) equipped with a FEG-type gun, STEM microscope is equipped with an EDS detector to analyse chemical composition. The fractures were analysed on Hitachi S-340N scanning electron microscope (SEM).

The compression test was carried out on the Zwick/Roell Z100. Tests were performed at ambient temperature on cylindrical shaped samples with the dimension of 6 mm in diameter and 9 mm in high. Was applied pressure force 100 kN clamping force. A Future-Tech FM-700 microhardness tester was used to measure hardness, using the Vickers method according to EN ISO 6507-1 with a load of 0.1 kg. Measurements of the electrical conductivity were carried out on the SIGMATEST 2.096 FOERSTER firm.

3. RESULTS

The force characteristics of the extrusion process of Al-33%Cu alloy are shown in Fig. 3 and it can be concluded that the extrusion force stabilizes in a short time, this is a consequence of recipe heating during processing.

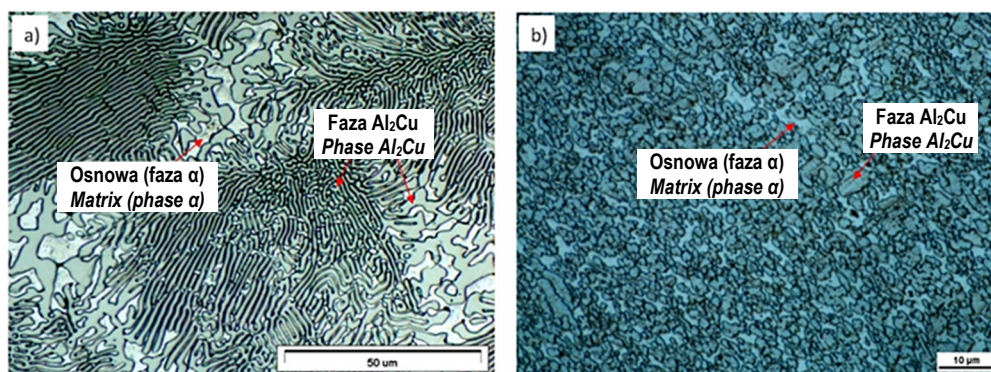


Rys. 3. Charakterystyka parametrów procesowych

Fig. 3. Characteristics of the process parameters

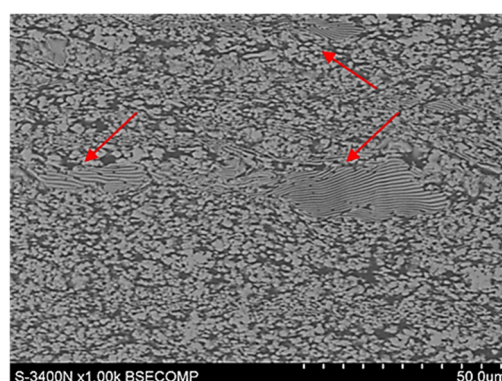
Na rys. 4a pokazano mikrostrukturę stopu eutektycznego po odlewaniu składającą się z lamelarnej (płytkowej) budowy fazy θ -Al₂Cu i osnowy α -Al. Natomiast na rys. 4b pokazano mikrostrukturę stopu po odkształcaniu KoBo. W wyniku działającego odkształcenia następuje fragmentacja (rozdrobienie) mikrostruktury stopu, wskutek czego faza θ -Al₂Cu przybiera wyraźnie globularny kształt. Pomimo zastosowanego procesu SPD nie dochodzi do całkowitego rozdrobnienia struktury. Obserwuje się bowiem mikroobszary nieodkształcone, jak pokazano na rys. 5, a także zróżnicowaną wielkość faz jako pozostałość po procesie odlewania. Przykładowe wyniki EDS rozkładu pierwiastków na powierzchni tzw. *mapping* (rys. 6a, 6b) potwierdzają omówioną różnicę składu fazowego świadczącą o występowaniu dwóch faz w analizowanych mikroobszarach.

Fig. 4a shows the microstructure of the eutectic alloy after casting. Microstructure consist of a lamellar Al₂Cu- θ phase and a α -Al matrix. Fig. 4b shows the microstructure of the alloy after KoBo deformation. As a result of the deformation, the microstructure of the alloy is fragmented, and in the results the Al₂Cu- θ phase has a globular shape. During SPD process used the structure is not completely fragmented. It was observed microareas that are not deformed as shown in Fig. 5, as well as differentiation in phase sizes as the residue from the casting process. Examples of EDS results of the elements distribution on the surface, so-called mapping (Fig. 6a, 6b) confirm the discussed difference in phase composition. This indicate the occurrence of two phases in the analysed microareas.

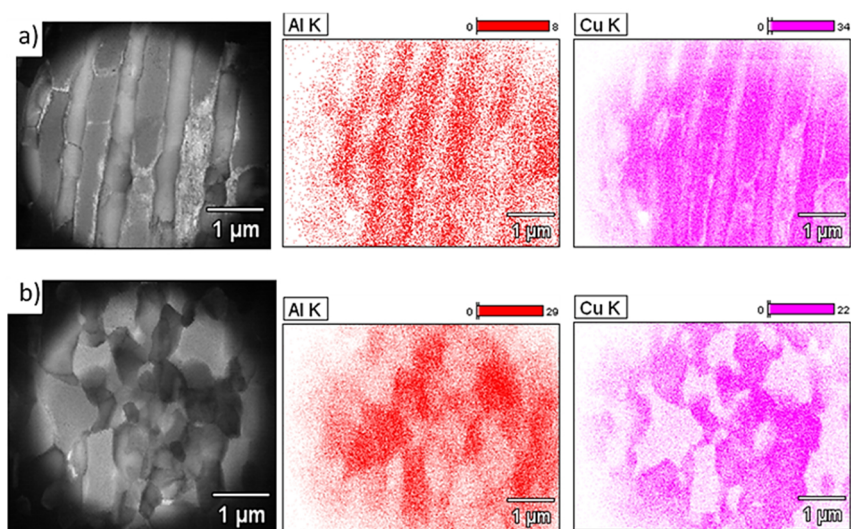


Rys. 4. a) Stan wyjściowy stopu Al-33%Cu po odlewaniu (LM),
b) stan po odkształceniu metodą KoBo (LM) bez wstępnego podgrzewania próbki

*Fig. 4. (a) Initial state of Al-33%Cu alloy after casting (LM),
(b) state after KoBo deformation (LM) without preheating of sample*



Rys. 5. Mikrostruktura stopu Al-33%Cu po odkształcaniu KoBo; strzałki wskazują strukturę nieodkształconą
Fig. 5. Microstructure of Al-33%Cu alloy after KoBo deformation; arrows indicate the not deformed structure

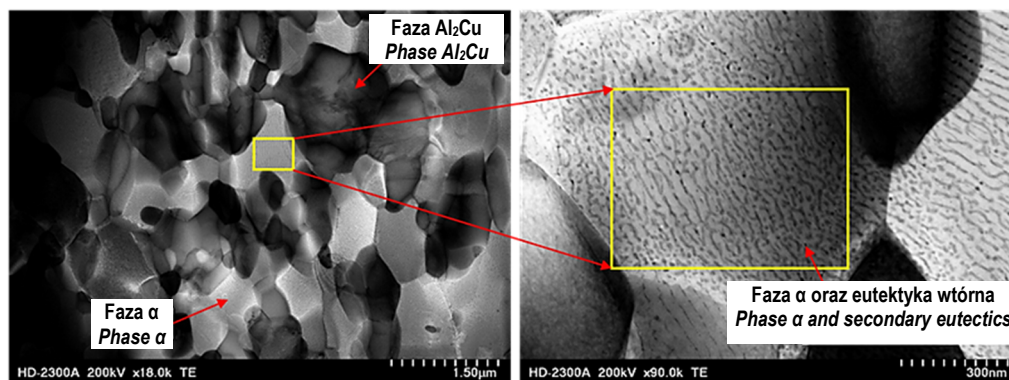


Rys. 6. Mikrostruktura stopu Al-33%Cu po odkształcaniu KoBo – mapping pierwiastków (a, b)

Fig. 6. Microstructure of Al-33%Cu alloy after KoBo deformation – elements mapping (a, b)

Szczegółowe badania z wykorzystaniem mikroskopu STEM (rys. 7) wskazują obecność wtórnej eutektyki w osnowie fazy α -Al.

Detailed investigations using the STEM microscope (Fig. 7) indicate the presence of secondary eutectics in the matrix α -Al phase.



Rys.7. Mikrostruktura stopu Al-33%Cu po odkształcaniu KoBo

Fig. 7. Microstructure of Al-33%Cu alloy after KoBo deformation

W tab. 1 pokazano zmiany twardości i konduktywności dla stopu Al-Cu w stanie po odlaniu i po odkształcaniu KoBo. Wykazano, że po odkształcaniu twardość wzrasta ok. 12% w porównaniu do stanu lanego. Wzrost twardości jest spowodowany przede wszystkim wzrostem gęstości defektów podczas deformacji. Przewodność elektryczna była na poziomie ok. 21 MS/m.

Tab. 1 shows the changes in microhardness and conductivity for the Al-Cu alloy in the cast and deformed state. It has been shown that hardness increases after deformation Approx. 12% compared to cast condition. The increase in hardness is mainly due to the increase of dislocation density during deformation. The electrical conductivity was about 21 MS/m.

Tab. 1. Wyniki pomiarów mikrotwardości (HV100) i przewodności elektrycznej MS/m
 Tab. 1. Results of microhardness (HV100) and electrical conductivity measurements MS/m

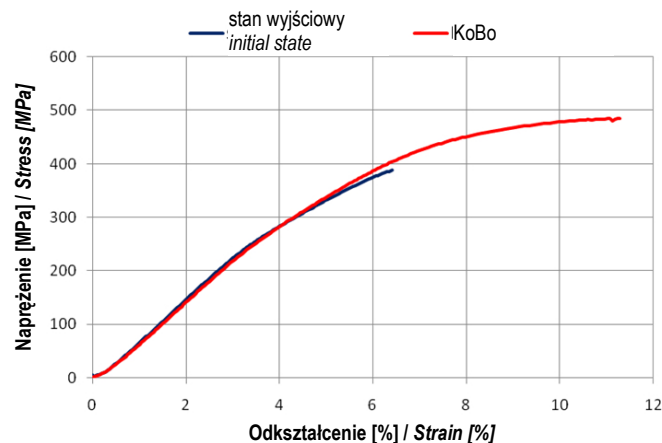
Temperatura / Temperature	Właściwości / Properties	Stan wyjściowy / Initial state	KoBo
20°C	HV100	185,7	205
	MS/m	21,29	21,9

Po przeprowadzonych próbach ściskania, na powierzchniach bocznych próbek stwierdzono występowanie pęknięć poślizgowych nachylonych pod kątem ok. 45° do osi próbki. Niszczenie próbek następowało dość nagle, co jest cechą charakterystyczną materiałów kruchych.

Charakterystyki naprężenie–odkształcenie uzyskane w statycznej próbie ściskania przedstawiono na rys. 8. Wykres ma charakter krzywoliniowy. Wytrzymałość na ściskanie R_c wynosi odpowiednio dla stopu po odlewaniu 390 MPa, po odkształcaniu KoBo 480 MPa. Skrócenie względne wynosi natomiast (~6,5%) i (~11%) odpowiednio dla stopu po odlewaniu i odkształcaniu KoBo. Wynika z tego wniosek, iż stop po odkształcaniu KoBo cechuje się korzystniejszymi właściwościami mechanicznymi niż stop po odlewaniu.

After the compression tests, the lateral surfaces of the specimens showed sliding cracks inclined at an angle of approx. 45° to the specimen's axis. Failure of the samples is quite suddenly, this is a characteristic feature of brittle materials.

The stress-strain characteristics obtained in the static compressive test are shown in Fig. 8. The graph is curvilinear. The compressive strength R_c is 390 MPa and 480 MPa for the alloy after casting and after KoBo respectively. The relative reduction is (~6.5%) and (~11%) for the alloy after casting and after KoBo respectively. This leads to the conclusion that the alloy after KoBo deformation has more favourable mechanical properties than the alloy after casting.



Rys. 8. Charakterystyki naprężenie–odkształcenie uzyskane w statycznej próbie ściskania dla stopu Al-33%Cu

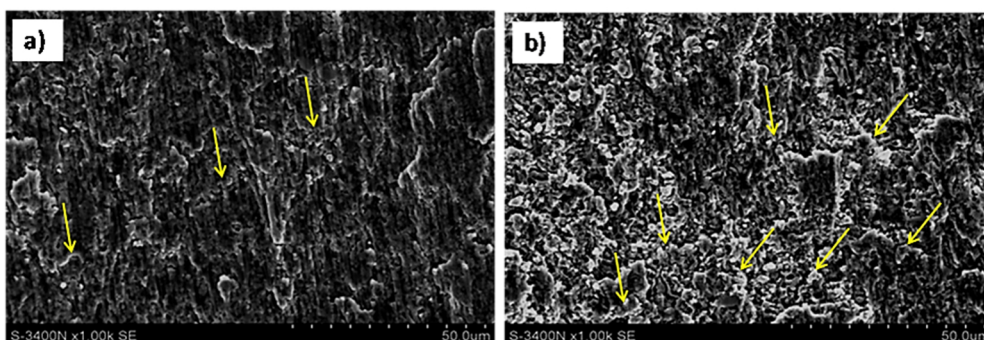
Fig. 8. Stress–strain characteristics obtained in the static compressive test for the Al-33%Cu alloy

Na rys. 9 pokazano powierzchnie przełomów po próbie ściskania. Wykazano, że w obydwu przypadkach mechanizmem inicjującym proces pęknięcia jest ścinanie. Wykazano pewne różnice w morfologii przełomów. Mianowicie w materiale po odkształcaniu KoBo można zauważyć większą gęstość pasm ścinania przebiegających w różnych kierunkach w porównaniu

Fig. 9 shows the surfaces of the fracture after the compression test. It has been shown that shear is the mechanism that initiates the cracking process in both cases. Some differences in fracture morphology have been found. Namely, a higher density of shear bands in different directions can be observed in the material after KoBo deformation compared to the material in

z materiałem w stanie po odlewaniu. Przykłady propagacji pasm ścinania oznaczono strzałkami. Z przedmiotowej literatury [6, 7] wynika, że propagowanie licznych, drobnych pasm ścinania może opóźnić zarodkowanie pęknięć, co jest jednoznaczne ze skłonnością materiału do większego odkształcenia. Innymi słowy zainicjowanie jednorodnego odkształcenia plastycznego w objętości próbki, które zależy oczywiście od mikrostruktury, będzie sprzyjać polepszeniu właściwości plastycznych stopu. Na podstawie badań SEM (rys. 9) można stwierdzić, że odkształcenie plastyczne stopu przerabianego metodą KoBo odbywa się poprzez formowanie i propagację licznych pasm odkształcania i ścinania przebiegających w wielu kierunkach. Jest to wynik rozdrobnienia struktury i wytworzenia w miarę równoosiowych ziarn. Należy zatem stwierdzić, iż rozdrobniona mikrostruktura do poziomu ultrametrycznego po zastosowaniu odkształcania KoBo jest kompromisem pomiędzy wytrzymałością a plastycznością w eutektycznym stopie Al-33%Cu.

the casting condition. Examples propagation of shear bands are indicated by arrows. According to the literature [6, 7], propagation of numerous, fine shear bands may delay nucleation of cracks, which is unequivocal to the tendency of the material to increase deformation. In other words, the initiation of homogeneous plastic deformation in the volume of the specimen, which obviously depends on the microstructure, will improve the plastic properties of the alloy. On the basis of SEM studies (Fig. 9) it can be concluded that plastic deformation of the alloy processed with the use of the Kobo method takes place by forming and propagation of numerous deformation bands and shear bands running in many directions. This is the result of structure fragmentation and formation of relatively equiaxed grains. It should be mentioned that the refinement microstructure to the ultrametric level after application of KoBo deformation is a compromise between strength and ductility in the eutectic alloy Al-33%Cu.



Rys. 9. Powierzchnie przełomów po ścisnaniu: a) odlew, b) KoBo

Fig. 9. Fracture surface after compression: (a) casting sample, (b) KoBo sample

Przedstawione wyniki są badaniami wstępnymi. Na otrzymanym materiale po odkształcaniu, planuje się przeprowadzić szersze badania wytrzymałościowe, między innymi w oparciu o statyczną próbę rozciągania w podwyższonych temperaturach.

The presented results are preliminary. On the material obtained after deformation, wider mechanical tests are planned, among others the static tensile tests at elevated temperatures.

4. WNIOSKI

- Po odlewaniu stopu Al-33%Cu do form piaskowych otrzymuje się mikrostrukturę eutek-

4. CONCLUSIONS

- An eutectic microstructure consisting of α -Al and θ -Al₂Cu phases is produced by casting of

tyczną składającą się z faz α -Al i θ -Al₂Cu. Krystalizujące fazy cechują się zróżnicowaną morfologią i wielkością.

2. Po zastosowaniu procesu KoBo dochodzi do fragmentacji faz, w wyniku czego otrzymuje się fazy o globularnej morfologii.
3. Mimo zastosowanego procesu SPD nie dochodzi do całkowitego ujednorodnienia struktury:
 - obserwuje się zróżnicowaną wielkość faz jako pozostałość po procesie odlewania;
 - obserwuje się mikroobszary nieodkształcone.
4. Odkształcenie stopu metodą KoBo przyczynia się do wzrostu właściwości wytrzymałościowych i plastycznych.
5. Proces KoBo z powodzeniem może być zastosowany do rozdrabniania struktury stopu o składzie eutektycznym.

PODZIĘKOWANIA

Praca wykonywana na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej w ramach badań statutowych BK225/RMO/2017 (11/990/BK-17/0045).

LITERATURA

- [1] Rambabu P., N. Eswara Prasad, V.V. Kutumbarao, R.J.H. Wanhill. 2017. Aluminium Alloys for Aerospace Applications. W *Aerospace Materials and Material Technologies. Vol.1: Aerospace Materials*, 29–52. Singapore: Springer Science+Business Media.
- [2] Davis J.R. 1994. *Aluminum and aluminum alloys. ASM Speciality Handbook*. Materials Park, OH, USA: ASM International.
- [3] Eswara Prasad N, G. Amol, R. Wanhill. 2014. *Aluminum–Lithium alloys: processing, properties and applications*. Oxford, UK: Elsevier Inc.
- [4] Wang J., S. Kang, H. Kim, Z. Horita. 2002. “Lamellae deformation and structural evolution in an Al-33%Cu eutectic Allom durig equal-channel angular pressing”. *Journal of Materials Science* 37: 5223–5227.
- [5] Park J.M., K.B. Kim, N. Mattern, R. Li, G. Liu, J. Eckert. 2010. „Multi chase Al-based ultrafine composite with multi-scale microstructure”. *Intermetallics* 18: 1829–1833.
- [6] Lee S.W., J.T. Kim, S.H. Hong, H.J. Park, J. Park, N.S. Lee, Y. Seo, J.Y. Suh, J. Eckert, D.H. J.M. Kim, Park, K.B. Kim. 2014. „Micro-to-nano-scale deformation mechanisms of a bimodal ultrafine eutectic composite”. *Scientific Reports* 4: 6500.

the Al-33%Cu alloy into sand moulds. The crystallising phases are characterized by different morphology and size.

2. After the application of the KoBo process, the phases are fragmented and have global morphology.
3. Despite the SPD processing, the structure is not completely homogenised:
 - different phase sizes are observed as a result of the casting process;
 - undeformed areas are visible in the sample volume.
4. The KoBo deformation contributes to the increase of strength and plastic properties.
5. The KoBo process can be successfully used to grain refinement of an eutectic alloy

ACKNOWLEDGEMENTS

Research conducted in Faculty of Materials Engineering and Metallurgy of Silesian University of Technology within statutory work BK225/RMO/2017 (11/990/BK-17/0045).

REFERENCES

- [1] Rambabu P., N. Eswara Prasad, V.V. Kutumbarao, R.J.H. Wanhill. 2017. Aluminium Alloys for Aerospace Applications. In *Aerospace Materials and Material Technologies. Vol.1: Aerospace Materials*, 29–52. Singapore: Springer Science+Business Media.
- [2] Davis J.R. 1994. *Aluminum and aluminum alloys. ASM Speciality Handbook*. Materials Park, OH, USA: ASM International.
- [3] Eswara Prasad N, G. Amol, R. Wanhill. 2014. *Aluminum–Lithium alloys: processing, properties and applications*. Oxford, UK: Elsevier Inc.
- [4] Wang J., S. Kang, H. Kim, Z. Horita. 2002. “Lamellae deformation and structural evolution in an Al-33%Cu eutectic Allom durig equal-channel angular pressing”. *Journal of Materials Science* 37: 5223–5227.
- [5] Park J.M., K.B. Kim, N. Mattern, R. Li, G. Liu, J. Eckert. 2010. “Multi chase Al-based ultrafine composite with multi-scale microstructure”. *Intermetallics* 18: 1829–1833.
- [6] Lee S.W., J.T. Kim, S.H. Hong, H.J. Park, J. Park, N.S. Lee, Y. Seo, J.Y. Suh, J. Eckert, D.H. J.M. Kim, Park, K.B. Kim. 2014. “Micro-to-nano-scale deformation mechanisms of a bimodal ultrafine eutectic composite”. *Scientific Reports* 4: 6500.

- [7] Kima J.T., S.W. Lee, S.H. Hong, H.J. Park, J. Park, N. Lee, Y. Seo, W. Wang, J. Man, K.B. Kim. 2016. „Understanding the relationship between microstructure and mechanical properties of Al–Cu–Si ultrafine eutectic composites”. *Materials and Design* 92: 1038–1045.
- [8] Thuong N.V., H. Zuhailawati, A.A. Seman, T.D. Huy, B. Kumar. 2015. „Microstructural evolution and wear characteristics of equal channel angular pressing processed semi-solid-cast hypoeutectic aluminium alloys”. *Materials and Design* 67: 448–456.
- [9] Fernanda Prados E., V. Luiz Sordi, M. Ferrante. 2008. „Microstructural Development and Tensile Strength of an ECAP-Deformed Al-4wt.(%) Cu Alloy”. *Materials Research* 11 (2): 199–205.
- [10] Rodak K., K. Radwański. 2016. „Influence of precipitates on the grain refinement in CuFe2 alloy processed by rolling with cyclic movement of rolls”. *Mater. Design* 110: 255–265.
- [11] Rodak K., K. Radwański, R. Molak. 2011. „Microstructure and mechanical properties of aluminium processed by multiaxial compression”. *Solid State Phenomena*. 176: 21–28.
- [12] Eizadjou M., A. Kazemi Talachi, H. Danesh Manesh, H. Shakur Shahabi, K. Janghorban. 2008. „Investigation of structure and mechanical properties of Multi-layered Al/Cu composite produced by accumulative roll bonding (ARB) process”. *Composites Science Technology* 68 (9): 2003–2009.
- [13] Ma A., N. Saito, M. Takagi, Y. Nishida, H. Iwata, K. Suzuki, I. Shigematsu, A. Watazu. 2005. „Effect of severe plastic deformation on tensile properties of a cast Al-11mass% Si Alom”. *Materials Science and Engineering A* 395: 70–76.
- [14] Bochniak W. 2009. *Teoretyczne i praktyczne aspekty plastycznego kształtowania metali. Metoda KoBo*. Kraków: Wyd. AGH.
- [15] Bochniak W., A. Korbel, P. Ostachowski, S. Ziółkiewicz, J. Borowski. 2013. „Wyciskanie metali i stopów metodą KOBO”. *Obróbka Plastyczna metali* 24 (2): 83–97.
- [16] Korneva A., B. Straumal, A. Kilmametov, L. Lityńska-Dobrzyńska, G. Cios, P. Bała, P. Zięba. 2016. „Effect of high pressure torsion on microstructure of Cu-Sn alloys with different content of Hume Rothery phase”. *Materials Characterization* 118: 411–416.
- [7] Kima J.T., S.W. Lee, S.H. Hong, H.J. Park, J. Park, N. Lee, Y. Seo, W. Wang, J. Man, K.B. Kim. 2016. “Understanding the relationship between microstructure and mechanical properties of Al–Cu–Si ultrafine eutectic composites”. *Materials and Design* 92: 1038–1045.
- [8] Thuong N.V., H. Zuhailawati, A.A. Seman, T.D. Huy, B. Kumar. 2015. “Microstructural evolution and wear characteristics of equal channel angular pressing processed semi-solid-cast hypoeutectic aluminium alloys”. *Materials and Design* 67: 448–456.
- [9] Fernanda Prados E., V. Luiz Sordi, M. Ferrante. 2008. “Microstructural Development and Tensile Strength of an ECAP-Deformed Al-4wt.(%) Cu Alloy”. *Materials Research* 11 (2): 199–205.
- [10] Rodak K., K. Radwański. 2016. “Influence of precipitates on the grain refinement in CuFe2 alloy processed by rolling with cyclic movement of rolls”. *Mater. Design* 110: 255–265.
- [11] Rodak K., K. Radwański, R. Molak. 2011. “Microstructure and mechanical properties of aluminium processed by multiaxial compression”. *Solid State Phenomena*. 176: 21–28.
- [12] Eizadjou M., A. Kazemi Talachi, H. Danesh Manesh, H. Shakur Shahabi, K. Janghorban. 2008. “Investigation of structure and mechanical properties of Multi-layered Al/Cu composite produced by accumulative roll bonding (ARB) process”. *Composites Science Technology* 68 (9): 2003–2009.
- [13] Ma A., N. Saito, M. Takagi, Y. Nishida, H. Iwata, K. Suzuki, I. Shigematsu, A. Watazu. 2005. “Effect of severe plastic deformation on tensile properties of a cast Al-11mass% Si Alom”. *Materials Science and Engineering A* 395: 70–76.
- [14] Bochniak W. 2009. *Teoretyczne i praktyczne aspekty plastycznego kształtowania metali. Metoda KoBo*. Kraków: Wyd. AGH.
- [15] Bochniak W., A. Korbel, P. Ostachowski, S. Ziółkiewicz, J. Borowski. 2013. “Extrusion of metals and alloys by KOBO method”. *Obróbka Plastyczna metali* 24 (2): 83–97.
- [16] Korneva A., B. Straumal, A. Kilmametov, L. Lityńska-Dobrzyńska, G. Cios, P. Bała, P. Zięba. 2016. “Effect of high pressure torsion on microstructure of Cu-Sn alloys with different content of Hume Rothery phase”. *Materials Characterization* 118: 411–416.