



## Kształtowanie właściwości mechanicznych konsolidowanego plastycznie stopu aluminium RS442 w procesach obróbki cieplnej

### *Development of mechanical properties of plastically consolidated RS442 aluminium alloy by heat treatment methods*

(1) Maciej Motyka<sup>1\*</sup>, (2) Tomasz Tokarski<sup>2</sup>, (3) Waldemar Ziaja<sup>1</sup>, (4) Mateusz Wędrychowicz<sup>2</sup>, (5) Jan Sieniawski<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Materiałoznawstwa, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, Poland

<sup>2</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Wydział Metali Nieżelaznych, Katedra Nauki o Materiałach i Inżynierii Metali Nieżelaznych, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

#### Informacje o artykule

Data przyjęcia: 28.08.2015

Data recenzji: 2.09.2015

Data akceptacji: 30.12.2015

#### Wkład autorów

- (1) Koncepcja publikacji, opracowanie założeń i zakresu prowadzonych badań, opracowanie i analiza wyników badań
- (2) Wytworzenie materiału do badań, badania mikroskopowe, opracowanie i analiza wyników badań
- (3) Opracowanie wyników badań wytrzymałościowych i ich analiza
- (4) Realizacja badań właściwości mechanicznych i opracowanie wyników
- (5) Analiza wyników badań

#### Streszczenie

Specjalistyczne metody rozdrabniania ziarn w metalach i ich stopach stanowią efektywny sposób poprawy ich właściwości mechanicznych. Zalicza się do nich konsolidację plastyczną szybko krystalizowanych form rozdrobnionych (płatków, proszków, itp.), umożliwiającą wytwarzanie półwyrobów i gotowych wyrobów o znacznie lepszych właściwościach użytkowych w porównaniu z elementami wytwarzanymi metodami tradycyjnymi. Konsolidację plastyczną uznaje się za interesującą metodę kształtowania mikrostruktury i właściwości mechanicznych stopów Al-Si. Może być alternatywą dla ich przeróbki plastycznej – utrudnionej ze względu na małą plastyczność tej grupy stopów. Konsolidowany plastycznie stop RS442 (AlSi12,5Fe5Cu3,5Mg1) charakteryzuje duże rozdrobnienie składników fazowych ich mikrostruktury (rozmiary ziarn osnowy <1 μm), co powoduje nawet 2-krotne zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie. Stop ten zachowuje swoje duże właściwości wytrzymałościowe nawet po wyżarzaniu w temperaturze 450°C. Zakłada się, że proces wydzielania się faz międzymetalicznych kompensuje osłabienie tego stopu powodowane rozrostem ziarn osnowy. Przedstawiono wyniki badań stopu RS442 konsolidowanego plastycznie w procesie wyciskania. Wsad stanowił stop w postaci szybko krystalizowanych płatków (w procesie *melt spinning*). Wytworzone pręty poddano obróbce cieplnej: wyżarzaniu 450°C/2h oraz przesycaniu 475°C/1h w wodzie i starzeniu w zakresie temperatury 50÷100°C. Wykonano badania mikrostruktury metodą SEM oraz właściwości mechanicznych – próba statyczna rozciągania ( $R_m$ ,  $R_{p0.2}$ ,  $A$ ) i pomiar twardości. Stwierdzono, że umacnianie wydzieleniowe konsolidowanego plastycznie stopu RS442 powoduje zmniejszenie jego granicy plastyczności (ok. 25%) przy zachowaniu wytrzymałości na rozciąganie i zwiększeniu twardości (ok. 10%).

**Słowa kluczowe:** stopy aluminium, rozdrobnienie ziaren, konsolidacja plastyczna, obróbka cieplna, właściwości mechaniczne

#### Article info

Received: 28.08.2015

Reviewed: 2.09.2015

Accepted: 30.12.2015

#### Abstract

Advanced methods for grain refinement in metals and alloys are effective way for improving their mechanical properties. They include plastic consolidation of rapid solidified disintegrated forms (flakes, powders, etc.) which enables manufacturing semi- and final products having much better operational properties comparing with traditional

\* Autor do korespondencji. Tel.: +48 17 865 11 23; Fax: 17 854 48 32; e-mail: motyka@prz.edu.pl

\* Corresponding author. Tel.: +48 17 865 11 23; Fax: 17 854 48 32; e-mail: motyka@prz.edu.pl

**Authors' contribution**

- (1) The concept of publication, development of the assumptions and range of the study, elaboration and analysis of test results
- (2) Preparation of test material, microscopic examination, elaboration and analysis of test results
- (3) Elaboration and analysis of the results of mechanical properties tests
- (4) Realization of mechanical properties tests and elaboration of the results
- (5) Analysis of the results of research

manufacturing methods. Plastic consolidation is acknowledged as particularly interesting method of development of microstructure and mechanical properties of Al-Si alloys. It can be alternative method for plastic working – difficult due to low plasticity of mentioned group of alloys. Characteristic feature of plastically consolidated RS442 alloy is high refinement of phase constituents (matrix grain size  $< 1 \mu\text{m}$ ) which results in even doubled static tensile strength. Alloy in this conditions preserves its high strength also after annealing at the temperature of  $450^\circ\text{C}$ . It was assumed that precipitation process of intermetallic phases compensated material softening caused by matrix grains growth. Plastic consolidation of rapidly solidified RS442 alloy flakes was conducted by extrusion method. Produced rods were heat treated – annealing at  $450^\circ\text{C}$  for 2h and solution treatment at the temperature of  $475^\circ\text{C}$  (1h) with water quenching and following ageing in the temperature range of  $50\text{--}100^\circ\text{C}$ . SEM microscopic and mechanical properties (tensile and hardness tests) examinations were carried out. It was found that precipitation hardening of plastically consolidated RS442 alloy led to reduction of its yield stress (about 25%) and increase in hardness (about 10%) without essential effect on ultimate tensile strength.

**Keywords:** aluminium alloys, grain refinement, plastic consolidation, heat treatment, mechanical properties

**1. WSTĘP**

Stopy Al-Si (siluminy) są powszechnie stosowane do produkcji elementów konstrukcyjnych – szczególnie w konstrukcjach pojazdów samochodowych. Charakteryzują się bardzo dobrą odpornością na korozję oraz małą gęstością – typową dla stopów aluminium. Do głównych wad należy ich względnie mała wytrzymałość, która jest efektem gruboziarnistej mikrostruktury. Stosując dodatki stopowe Fe, Cu i innych pierwiastków, można zwiększyć właściwości mechaniczne siluminów, szczególnie w podwyższonej temperaturze, kosztem właściwości technologicznych jak lejność i skrawalność. Właściwości mechaniczne i skrawalność odlewów ze stopów Al-Si obniża obecność w ich mikrostrukturze iglastych wydzielen krzemu, których rozmiar można zmniejszyć, stosując dodatki modyfikatorów [1].

Rozdrobnienie ziarn mikrostruktury stopów Al-Si metodami przeróbki plastycznej jest utrudnione ze względu na małą ich plastyczność. Alternatywą wydaje się być konsolidacja plastyczna, umożliwiająca wytwarzanie litego materiału z szybko krystalizowanych form rozdrobnionych – np. rozdrobnionej taśmy amorficznej lub częściowo amorficznej [2].

Konsolidacja plastyczna jest procesem złożonym z kilku operacji technologicznych – ich liczba i warunki są determinowane właściwościami materiału oraz morfologią formy roz-

**1. INTRODUCTION**

Al-Si alloys are widely used for structural parts – especially produced for automotive industry. They are characterized by very good corrosion resistance and low density – typical for aluminium alloys. One of the main fault is relatively low strength resulting from coarse-grained microstructure. Through addition of alloying components like Fe, Cu and others it is possible to increase mechanical properties of Al-Si alloys, mainly at elevated temperature, but at the cost of technological properties like castability and machinability. Lower mechanical properties and machinability of Al-Si casts results from the presence of acicular silicon precipitations, which can be partially refined by adding inoculants [1].

Grain refinement in Al-Si alloys by plastic working methods is difficult because of their low plasticity. Alternative method seems to be plastic consolidation which enables manufacturing of solid material from rapidly solidified small size forms of material – e.g. disintegrated amorphous or partially amorphous ribbon [2].

Plastic consolidation is the process composed of few technological operations – their number and conditions are determined by material properties and parent substrate mor-

drobnionej substratu, a także rodzajem głównej operacji plastycznej zastosowanej do konsolidacji. Operacją główną może być np. kucie matrycowe lub walcowanie jednak ze względu na stan naprężenia i dużą wartość odkształcenia plastycznego preferowane jest wyciskanie. Proces wyciskania jest stosowany z powodzeniem od wielu lat na Wydziale Metali Nieżelaznych AGH w Krakowie do konsolidacji plastycznej stopów aluminium. Umożliwia silne rozdrobnienie składników fazowych ich mikrostruktury (rozmiar ziarn osnowy  $< 1 \mu\text{m}$ ), czego konsekwencją jest nawet 2-krotne zwiększenie wytrzymałości do-raznej [3, 4]. Szczególnie interesujące wyniki otrzymuje się dla odlewniczych stopów Al-Si – po konsolidacji wykazują znacznie większą plastyczność w porównaniu ze swoimi konwencjonalnymi odpowiednikami, a przeróbka plastyczna (np. walcowanie bruzdowe) powoduje dodatkowe ich umocnienie. Wyniki dotychczasowych badań submikrokryształicznego stopu RS442 wskazują na jego interesujące właściwości w stanie wyżarzonym. Powszechnie przyjmuje się, że ultradrobnosiarniste materiały metaliczne otrzymane metodami odkształcania plastycznego wykazują stabilność swojej mikrostruktury do określonej wartości temperatury, powyżej której następuje rekrytalizacja (rozrost ziarn) powodująca zmniejszenie właściwości mechanicznych [5, 6]. Tymczasem w stopie RS442 wyżarzonym w temperaturze  $450^\circ\text{C}$  w czasie 2h stwierdzono zwiększenie granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie [4, 7]. Wyniki wstępnych badań mikroskopowych metodami TEM wskazują na możliwość wydzielania się faz międzymetalicznych, powodujących umocnienie stopu.

## 2. METODYKA BADAŃ

Do badań przyjęto stop RS442 (tab. 1) konsolidowany plastycznie metodą wyciskania w Katedrze Nauki o Materiałach i Inżynierii Metali Nieżelaznych na Wydziale Metali Nieżelaznych AGH w Krakowie. Wsad do konsolidacji stanowiła częściowo amorficzna taśma wytworzona metodą *melt spinning*, rozdrobniona do postaci drobnych płatków. Płatki zagęszczano

*phology, also type of main plastic deformation method used for consolidation. As a main plastic working operation close-die morphology, also type of main plastic deformation method used for consolidation. As a main plastic working operation close-die forging or rolling can be used – but due to state of stress and high deformation degree the extrusion is preferred. Plastic consolidation of aluminium alloys by extrusion has been successfully used for many years at Faculty of Non-Ferrous Metals at AGH UT in Cracow. It enables high refinement of phase constituents of their microstructure (matrix grain size  $< 1 \mu\text{m}$ ) which results in even doubled static tensile strength [3, 4]. Particularly interesting results are obtained in the case of cast Al-Si alloys – in plastically consolidated state they exhibit significantly higher plasticity comparing to their conventional equivalents. Moreover, following plastic working (e.g. groove rolling) causes their additional strengthening. Previously obtained results for submicro-crystalline RS442 alloy indicate its unique properties in annealed state. It is generally accepted that ultrafine-grained metallic materials produced by plastic deformation methods exhibit microstructural stability up to particular temperature, above which recrystallization (grain growth) takes place causing reduction of mechanical properties [5, 6] Meanwhile for RS442 alloy annealed at the temperature of  $450^\circ\text{C}$  for 2h increase of yield stress and ultimate tensile strength was found [4, 7]. Results of preliminary TEM microscopic examinations indicate possibility of precipitation of intermetallic phases leading to alloy hardening.*

## 2. RESEARCH METHODOLOGY

*RS442 alloy (Tab. 1) plastically consolidated by extrusion method at the Department of Materials Science and Engineering of Non-Ferrous Metals at AGH UT in Cracow was examined. The feedstock for consolidation was partially amorphous ribbon made by melt spinning method, disintegrated to small sized flakes. Flakes were initially cold compacted at the*

wstępnie w procesie wyciskania na zimno stosując nacisk 560 MPa. Zagęszczony wsad o średnicy  $\phi=38$  mm i długości  $l=35$  mm poddano odgazowaniu w temperaturze 400°C i czasie 20 min, a następnie bezpośrednio umieszczono w pojemniku prasy. Wyciskanie realizowano w temperaturze 400°C z prędkością tłoka  $V=0,5$  mm/s uzyskując odkształcenie  $\lambda=25$ . Otrzymano półwyrob w postaci pręta o średnicy  $\phi=8$  mm. Stan materiału bez wyżarzania oznaczono jako wariant 1.

Część prętów poddano wyżarzaniu w temperaturze 450°C i czasie 2 h (wariant 2). Konsolidowany plastycznie stop RS442 poddano również umacnianiu wydzieleniowemu – (wariant 3) – przesycając w wodzie z temperatury 475°C (1h) i starzenie w temperaturze pokojowej, 50 oraz 100°C. Jako materiał referencyjny przyjęto stop RS442 w stanie odlanym, a następnie wyciskany (bez konsolidacji – wariant 4).

pressure of 560 MPa. Compacted feedstock having  $\phi=38$  mm diameter and  $l=35$  mm length was degassed at the temperature of 400°C for 20 min and further placed in the press recipient. Extrusion process was realized at 400°C for plunger velocity of  $V=0,5$  mm/s up to total deformation degree  $\lambda=25$ . As a consequence the semi-product in the form of  $\phi=8$  mm diameter rod was received. This material state – without annealing – was referred in the paper as variant 1.

Some rods were annealed at the temperature of 450°C for 2 h (variant 2). Plastically consolidated RS442 alloy was also precipitation hardened – (variant 3) – solution treatment at the temperature of 475°C (1h) with water quenching and ageing at room temperature and at the temperature of 50 and 100°C. As a reference material cast and extruded RS442 alloy (without plastic consolidation) was employed (variant 4).

Tab. 1. Skład chemiczny stopu RS442

Tab. 1. Chemical composition of RS442 alloy

Zawartość pierwiastka, % mas. / Element content, % wt.						
Si	Fe	Cu	Mg	Zr	Ti	Al
12,5	5	3,5	1,0	0,2	0,1	reszta / balance

Badania mikrostruktury prowadzono za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego Hitachi SU70. Właściwości mechaniczne ( $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ ,  $A_{100}$ ) wyznaczono w próbie statycznej rozciągania na maszynie Zwick Z50. Pomiar twardości wykonano stosując twardościomierze Shimadzu HMV-2T (HV1) oraz Nexus 4303 (HV0,3).

Microstructural examinations were realized using scanning electron microscope Hitachi SU70. Mechanical properties ( $\sigma_m$ ,  $\sigma_{p0,2}$ ,  $A_{100}$ ) were determined in tensile tests on Zwick Z50 machine. Hardness was measured on Shimadzu HMV-2T (HV1) and Nexus 4303 (HV0.3) hardness testers.

### 3. WYNIKI I ICH DYSKUSJA

Stop RS442 nie konsolidowany plastycznie (wariant 4) – przyjęty jako referencyjny – charakteryzują właściwości typowe dla konwencjonalnych siluminów odlewniczych o zbliżonym składzie chemicznym (tab. 2). Jego konsolidacja plastyczna (wariant 1) powoduje ok. 2-krotne zwiększenie jego granicy plastyczności ( $R_{p0,2}$  z 170 do 410 MPa) i wytrzymałości na roz-

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

Unconsolidated RS442 alloy (variant 4) – reference material – exhibits properties typical for conventional cast high-silicon aluminium alloys having similar chemical composition (Tab. 2). Plastic consolidation causes about two-fold increase of its yield stress ( $\sigma_{p0,2}$  from 170 to 410 MPa) and ultimate tensile strength ( $\sigma_m$  from 270 to 500 MPa). Enhancement of hardness is

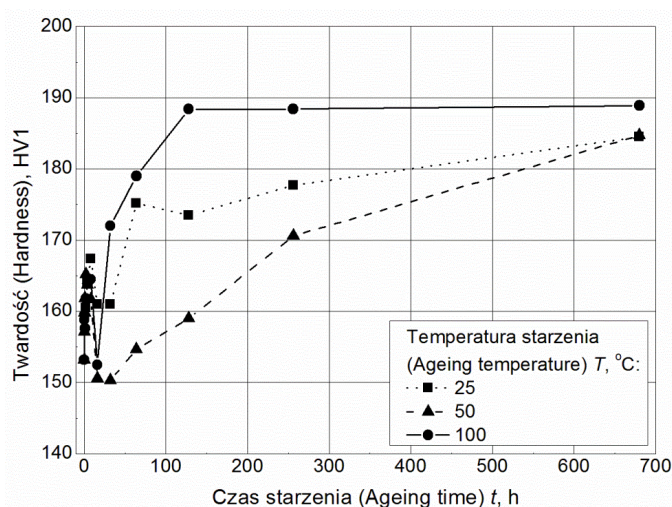
rozciąganie ( $R_m$  z 270 do 500 MPa). Wzrost twardości jest mniej znaczący i wynosi ok. 30% (tab. 2). Wyżarzanie (450°C/2h) po konsolidacji plastycznej powoduje dalszy wzrost  $R_m$  (555 MPa), nie wpływa natomiast znacząco na wartość  $R_{p0,2}$  i twardość (tab. 2). Przyjęcie wariantu stopu RS442 umacnianego wydzieleniowo wymagało ustalenia maksymalnego efektu utwardzenia w wyniku starzenia. Na podstawie wyników pomiarów twardości stwierdzono, że wartość maksymalną – 189 HV (rys. 1 i tab. 2) – dla przyjętych warunków umacniania wydzieleniowego osiągnięto po starzeniu w temperaturze 100°C. Twardość w stopie tak obrabionym cieplnie (wariant 3 – tab. 2) jest największa spośród wszystkich zastosowanych wariantów obróbki cieplnej. Umocnienie wydzieleniowe pozwala osiągać wytrzymałość na rozciąganie zbliżoną do stanu wyżarzanego (wariant 2 – tab. 2).

less significant in this case – about 30% (Tab. 2). Annealing (450°C/2h) after plastic consolidation leads to further increase of  $\sigma_m$  (555 MPa) and does not influence significantly  $\sigma_{p0,2}$  and hardness (Tab. 2). In the case of plastically consolidated and precipitation hardened RS442 alloy it was necessary to determine maximum hardening effect caused by ageing. Based on hardness tests results it was found that maximum hardness – 189 HV (Fig. 1 and Tab. 2) – for applied conditions of precipitation hardening was obtained after ageing at the temperature of 100°C. Hardness in this case (variant 3 – Tab. 2) is the highest among all used variants of heat treatment. Precipitation hardening gives results similar to annealing (variant 2 – Tab. 2).

Tab. 2. Właściwości mechaniczne stopu RS442

Tab. 2. Mechanical properties of RS442 alloy

Wariant Variant	Granica plastyczności $R_{p0,2}$ Yield stress $\sigma_{p0,2}$ MPa	Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ Ultimate yield stress $\sigma_m$ MPa	Wydłużenie $A_{100}$ Elongation $A_{100}$ %	Twardość HV0,3 HV0.3 Hardness
1	410	500	1,5	171
2	420	555	2,0	165
3	310	550	1,7	189
4	170	270	1,8	132



Rys. 1. Wpływ czasu i temperatury starzenia na twardość stopu RS442

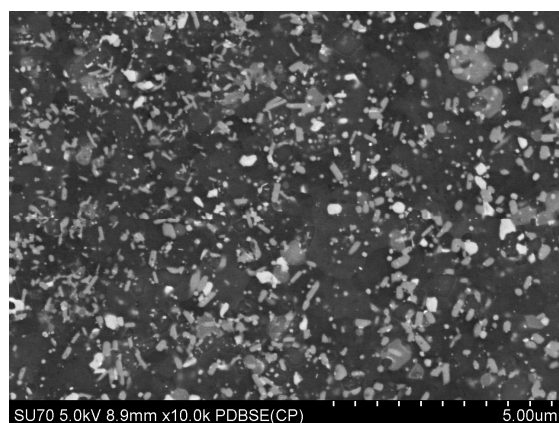
Fig. 1. The effect of ageing time and temperature on hardness of RS442 alloy

Badania mikroskopowe nie wykazały nieciągłości mikrostruktury stopu RS442, potwierdzając jego pełną konsolidację w procesie wyciskania (rys. 2a,b). Szczegółowa analiza fazowa jest utrudniona ze względu na złożony skład chemiczny (tab. 1). Na podstawie wyników obserwacji SEM/BSE stwierdzono w mikrostrukturze obecność wydzielań faz międzymetalicznych, które w stopach o zbliżonym składzie zawierają zwykle pierwiastki ciężkie, głównie Fe, Cu i Si, w osnowie roztworu stałego Al (rys. 2a, c–e). Bardzo mały rozmiar wydzielań uniemożliwia analizę ich składu chemicznego metodą SEM/EDS. Technika BSE uniemożliwia precyzyjne określenie rozmiaru ziarn osnowy – mały kontrast granic ziarn. Na podstawie wcześniej prowadzonych badań metodami TEM ustalono, że średni rozmiar ziarn w konsolidowanym plastycznie stopie RS442 wynosi około  $0,4 \mu\text{m}$  [4].

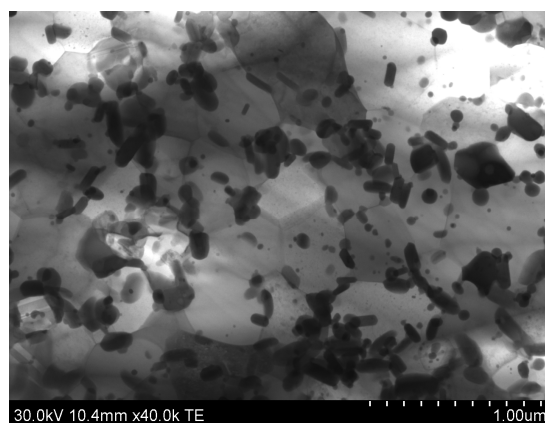
Wyżarzanie w temperaturze  $450^\circ\text{C}$ , o  $50^\circ\text{C}$  wyższej niż temperatura konsolidacji plastycznej w procesie wyciskania, umożliwia dalsze wydzielanie faz międzymetalicznych i ich koagulację (rys. 2c).

*Microscopic observations did not indicate discontinuities in microstructure of RS442 alloy, confirming its full consolidation in extrusion process (Fig. 2a,b). Detailed phase analysis is difficult because of complex alloy chemical composition (tab. 1). Based on the results of SEM/BSE observations the presence of intermetallic phases was found (Fig. 2a, c–e). In alloys having similar chemical composition this kind of phases contain usually heavy elements, mainly Fe, Cu and Si, in the matrix of Al solid solution. Very small size of precipitations makes impossible chemical composition analysis of them by SEM/EDS method. BSE technique precludes determination of matrix grain size – low contrast of grain boundaries. On the basis of previously realized TEM observations it was established that average grain size in plastically consolidated RS442 alloy is about  $0.4 \mu\text{m}$  [4].*

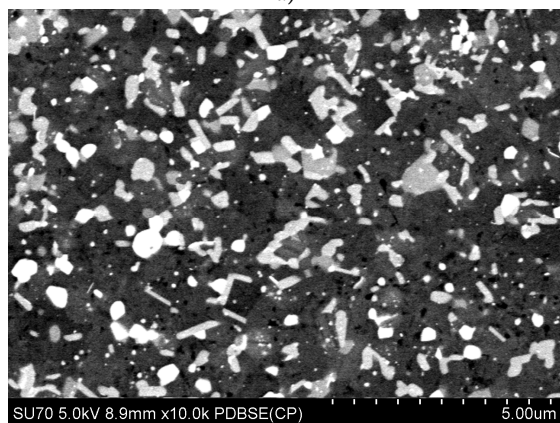
*Annealing at the temperature of  $450^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$  higher than plastic consolidation temperature in extrusion process, enables further precipitation of intermetallic phases and their coagulation (Fig. 2c).*



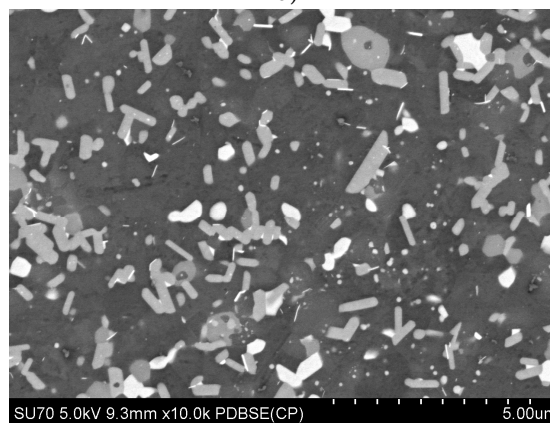
a)



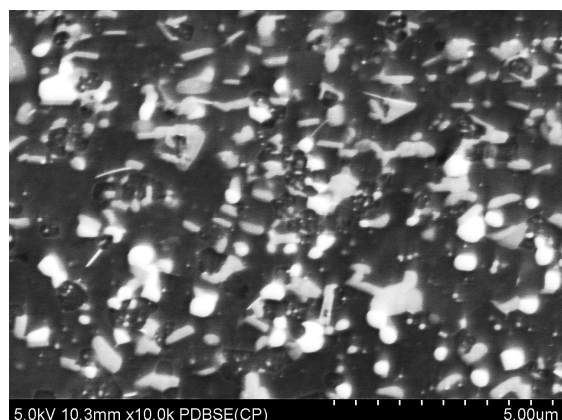
b)



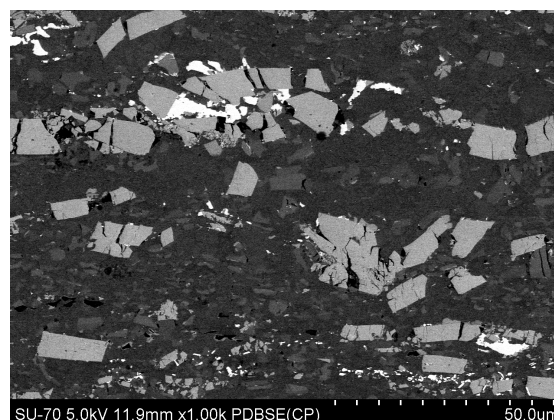
c)



d)



e)



f)

Rys. 2. Mikrostruktura stopu RS442 (SEM) konsolidowanego plastycznie – wariant 1 (a, b – TEM [4]), konsolidowany plastycznie i wyżarzany – wariant 2 (c), konsolidowany plastycznie i przesycony (d), konsolidowany plastycznie, przesycony i starzony – wariant 3 (e) oraz nie konsolidowany – wariant 4 (f)

Fig. 2. Microstructure of RS442 alloy (SEM): plastically consolidated – variant 1 (a, b – TEM [4]), plastically consolidated and annealed – variant 2 (c), plastically consolidated and solution treated (d), plastically consolidated, solution treated and aged – variant 3 (e) and unconsolidated (reference material) – variant 4 (f)

Przesycanie (475°C/1h/woda), podobnie jak wyżarzanie, powoduje koagulację (wzrost) wydzieleni faz międzymetalicznych (rys. 2d). Po starzeniu w temperaturze 100°C nie stwierdzono istotnych różnic w mikrostrukturze stopu (rys. 2e) w porównaniu do stanu przesyconego (rys. 2d). Nie można wykluczyć, że znaczące utwardzenie stopu po starzeniu (tab. 2) jest efektem wydzielania się wtórnych faz o małych rozmiarach – trudnych do identyfikacji za pomocą przyjętej metody obserwacji. Zwiększenie twardości i zmniejszenie granicy plastyczności (tab. 2) jest z pewnością zjawiskiem unikatowym. Można przypuszczać, że jest efektem połączonego oddziaływania rozrostu ziarn osnowy stopu i jej zubożenia w pierwiastki stopowe oraz tworzenia się bardzo drobnych wydzieleni faz międzymetalicznych, przypuszczalnie bogatych w Cu [7].

Mikrostruktura stopu nie konsolidowanego plastycznie jest gruboziarnista (rys. 2f). Dużą kruchość wydzieleni potwierdzają liczne ich pęknięcia, powstałe w procesie wyciskania.

#### 4. WNIOSKI

Na podstawie analizy wyników badań sformułowano następujące wnioski:

*Solution treatment (475°C/1h/water), similarly to annealing, causes coagulation (growth) of intermetallic phase precipitations (Fig. 2d). After ageing at the temperature of 100°C substantial differences in alloy microstructure were not found (Fig. 2e), comparing with solution treated state (Fig. 2d). It cannot be excluded that considerable hardening after ageing (Tab. 2) results from precipitation of very small secondary phases – difficult for identification by observation methods used. Hardness increase accompanied by yield stress reduction (Tab. 2) is rather unique behaviour. It can be assumed that it is effect of combined interaction of growth of matrix grains and its depletion of alloying elements, also formation of small size precipitations of intermetallic phases – presumable rich in Cu [7].*

*Microstructure of unconsolidated RS442 alloy is coarse-grained (Fig. 2f). High brittleness of precipitations was confirmed by several cracks formed during extrusion process.*

#### 4. CONCLUSIONS

*Based on the analysis of test results the following conclusions were drawn:*

- szybka krystalizacja i konsolidacja plastyczna stopu RS442 umożliwia rozdrobnienie jego mikrostruktury do zakresu submikrokryształicznego i znaczące zwiększenie właściwości mechanicznych;
  - konsolidowany plastycznie stop RS442 zachowuje wysokie właściwości mechaniczne do temperatury 450°C;
  - wpływ umacniania wydzieleniowego na właściwości mechaniczne konsolidowanego plastycznie stopu RS442 jest złożony – stwierdzono zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie i przede wszystkim twardości oraz zmniejszenie granicy plastyczności.
- *rapid solidification and plastic consolidation of RS442 alloy enables grain refinement of its microstructure up to submicrocrystalline range and significant increase of its mechanical properties;*
  - *plastically consolidated RS442 alloy preserves its high mechanical properties up to the temperature of 450°C;*
  - *the effect of precipitation hardening on mechanical properties of plastically consolidated RS442 alloy is complex – increase of ultimate tensile strength and especially of hardness was found while yield stress decreased distinctly.*

## PODZIĘKOWANIA

Pracę wykonano w ramach realizacji Projektu Kluczowego „NANOMET” – nr POIG.01.03.01-00-015/08-00.

## LITERATURA

- [1] Dybiec, Henryk, Motyka, Maciej. 2011. “Influence of grain refining on abrasive wear of submicrocrystalline Al-Si alloys.” *Materials Science Forum* 674 (3): 97–104.
- [2] Dybiec, Henryk. 2008. *Submikrostrukturalne stopy aluminium*. Kraków: Ucz. Wyd. Nauk.-Dyd.
- [3] Dybiec, Henryk 2007. “Plastic consolidation of metallic powders.” *Archives of Metallurgy and Materials* 52 (2): 161–170.
- [4] Motyka, Maciej, Tokarski, Tomasz, Ziaja, Waldemar, Dybiec, Henryk, Sieniawski Jan. 2013. “High cycle fatigue bending strength of rapidly solidified and plastic consolidated RS442 aluminium alloy.” *Journal of Materials Science* 48: 4796–4800.
- [5] Valiev, R.Z., Islamgaliev, R.K., Alexandrov, I.V. 2000. “Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation.” *Progress in Materials Science* 45: 103–189.
- [6] Bazarnik, Piotr, Lewandowska, Małgorzata, Andrzejczuk, Mariusz, Kurzydłowski, Krzysztof J. 2012. “The strength and thermal stability of Al-5Mg alloys nano-engineered using methods of metal forming.” *Materials Science and Engineering A* 556: 134–139.
- [7] Motyka, Maciej, Tokarski, Tomasz, Ziaja, Waldemar, Wędrychowicz, Mateusz. 2015. “The effect of heat treatment on static and dynamic mechanical properties of rapidly solidified and plastically consolidated RS442 aluminium alloy” *Key Engineering Materials* 641: 17–23.

## ACKNOWLEDGMENT

*Financial support of Structural Funds in the Operational Program – Innovative Economy (IE OP) financed by the European Regional Development Fund – Project No POIG.01.03.01-00-015/08 (NANOMET) is gratefully acknowledged.*

## REFERENCES

- [1] Dybiec, Henryk, Motyka, Maciej. 2011. “Influence of grain refining on abrasive wear of submicrocrystalline Al-Si alloys.” *Materials Science Forum* 674 (3): 97–104.
- [2] Dybiec, Henryk. 2008. *Submikrostrukturalne stopy aluminium*. Kraków: Ucz. Wyd. Nauk.-Dyd.
- [3] Dybiec, Henryk 2007. “Plastic consolidation of metallic powders.” *Archives of Metallurgy and Materials* 52 (2): 161–170.
- [4] Motyka, Maciej, Tokarski, Tomasz, Ziaja, Waldemar, Dybiec, Henryk, Sieniawski Jan. 2013. “High cycle fatigue bending strength of rapidly solidified and plastic consolidated RS442 aluminium alloy.” *Journal of Materials Science* 48: 4796–4800.
- [5] Valiev, R.Z., Islamgaliev, R.K., Alexandrov, I.V. 2000. “Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation.” *Progress in Materials Science* 45: 103–189.
- [6] Bazarnik, Piotr, Lewandowska, Małgorzata, Andrzejczuk, Mariusz, Kurzydłowski, Krzysztof J. 2012. “The strength and thermal stability of Al-5Mg alloys nano-engineered using methods of metal forming.” *Materials Science and Engineering A* 556: 134–139.
- [7] Motyka, Maciej, Tokarski, Tomasz, Ziaja, Waldemar, Wędrychowicz, Mateusz. 2015. “The effect of heat treatment on static and dynamic mechanical properties of rapidly solidified and plastically consolidated RS442 aluminium alloy” *Key Engineering Materials* 641: 17–23.