

prof. dr hab. inż. Stefan SZCZEPANIK

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej

E-mail: szczepan@metal.agh.edu.pl

Przetwórstwo zaawansowanych materiałów otrzymanych z proszków na osnowie aluminium

Processing of advanced aluminum based PM materials

Streszczenie

Zastosowanie metod metalurgii proszków w połączeniu z procesami przeróbki plastycznej umożliwia wytworzenie nowych materiałów konstrukcyjnych. Materiały gradientowe i kompozytowe na osnowie aluminium stanowią unikalny typ tworzyw konstrukcyjnych. Materiały gradientowe stanowią grupę kompozytów wytworzonych z dwóch lub więcej składników, które mają zmienny skład chemiczny w określonym kierunku. Uzyskuje się w ten sposób zmianę własności mechanicznych lub fizycznych w tym kierunku oraz określone własności eksploatacyjne i użytkowe wyrobu. Daje to duże możliwości rozwiązań przy projektowaniu i wytwarzaniu strukturalnych wyrobów. Specjalną grupę materiałów konstrukcyjnych stanowią kompozyty na osnowie metalowej umocnione cząstkami celem poprawy sztywności, wytrzymałości i własności użytkowych, do których należy odporność na zużycie. Do kompozytów na osnowie proszku aluminium umocnionych cząstkami stosuje się wyciskanie lub prasowanie na gorąco. Przedstawiono wyniki badań wpływu przeróbki plastycznej warstwowych materiałów gradientowych na osnowie proszku aluminium, a także wyprasek z proszku aluminium i kompozytów na jego umocnionych cząstkami (Al-SiC). Proces wytwarzania obejmował mieszanie proszków, prasowanie w temperaturze otoczenia i kucie matrycowe lub wyciskanie na gorąco wyprasek w warunkach izotermicznych. Zbadano wpływ parametrów formowania na gorąco na własności mechaniczne tak wytworzonych materiałów jak również wpływ wyciskania i ciągnięcia na granicę plastyczności kompozytu Al-10% SiC i materiału osnowy. W wyniku ciągnięcia zwiększyła się granica plastyczności kompozytu ze 115 MPa na 138 MPa, a naprężenie płynięcia zwiększyło się ze 150 MPa na 185 MPa przy odkształceniu wynoszącym 0,75.

Abstract

PM processing routes for construction materials include those for gradient and composite materials based on aluminium. Gradient materials are a type of composite, formed from two or more distinct constituents, which exhibit a graded composition. Thus one material appears to transform to another, producing gradual changes in characteristics and resultant new exploitable functional properties. Accordingly these materials extend the range of structural components. PM metal matrix particulate composites are developed to improve stiffness, strength and specific properties such as wear resistance. Hot pressing (consolidation) and hot extrusion are suitable for PM Al matrix particulate composites. In the presentation the results of investigation on processing of PM aluminium alloy based gradient materials, and aluminium and Al-SiC_{particle} composite processed by hot forming and drawing, are discussed. Forming of materials from aluminium powder and mixtures of this powder and silicon carbide particles or Al- alloy powder and processing of two-layer products based on these materials are considered. Forming involved mixing of basic powders, pressing at room temperature and hot closed-die forging of the compacts in isothermal conditions. The influence of hot forming parameters on the mechanical properties of Al and the composite materials was evaluated. Extrusion and drawing of Al-10%SiC increased the yield stress from 115 to 138 MPa and the flow stress at 0.75 strain from 150 to 185 MPa.

Słowa kluczowe: proszki aluminium i stopów aluminium, kompozyty na osnowie aluminium, cząstki węgla krzemu, wyciskanie, ciągnięcie, umacnianie, właściwości mechaniczne

Keywords: aluminum and aluminum alloys powders, composites with an aluminium matrix, silicon carbide particles, extrusion, drawing, reinforcing, mechanical properties

1. WSTĘP

Kształtowanie stopów i metali litych może być wykonywane na gorąco lub zimno. Kształtowanie na gorąco obejmuje walcowanie, wyciskanie i tłoczenie. Kształtowaniu na zimno powoduje dodatkowo umocnienie materiałów oraz prowadzi do uzyskania lepszej jakości i dokładności wymiarowej produktów. Wszystkie procesy są odpowiednie dla metali litych, ale nie wszystkie materiały są tak samo przystosowane do kształtowania na gorąco.

Specjalną grupę materiałów konstrukcyjnych stanowią kompozyty na osnowie metalowej umocnione cząstkami celem poprawy sztywności, wytrzymałości i własności użytkowych, do których należy odporność na zużycie. Dla kompozytów na osnowie metalowej (MMC) stosowane jest odlewanie oraz procesy metalurgii proszków (PM). Dla kompozytów na osnowie aluminium wytwarzanych metodą metalurgii proszków, umacnianych cząstkami stałymi, odpowiednie jest wyciskanie lub prasowanie na gorąco, szczególnie, gdy cząstki nie reagują z osnową. Przetwórstwo poprzez kucie i wyciskanie kompozytów uzyskanych w procesie metalurgii proszków opisano między innymi w [1, 2, 3]. Kształtowanie na gorąco skutkuje zagęszczeniem materiału, a po przeróbce na zimno jego umocnieniem przez cząstki, zgodnie z mechanizmem Orowan'a. Wpływ wyciskania materiałów Al-X% SiC na gęstość i właściwości mechaniczne przedstawiono w pracy [4]. Produkty wyciskane zostały zagęszczone do gęstości materiałów litych, ale dla dalszego wzmocnienia kompozytu konieczna jest przeróbka plastyczna na zimno. Badanie skoncentrowano na opracowaniu składu chemicznego, konstrukcji i właściwości wyrobów [4, 5, 6]. Wzrost granicy plastyczności materiałów lekkich stwarza nowe możliwości dla ich rozwoju jako materiałów konstrukcyjnych. W niniejszej publikacji przedstawiono wyniki kucia matrycowego materiałów gradientowych otrzymanych z proszków na osnowie aluminium oraz wyciskania kompozytu Al-10% SiC, a także jego ciągnięcia.

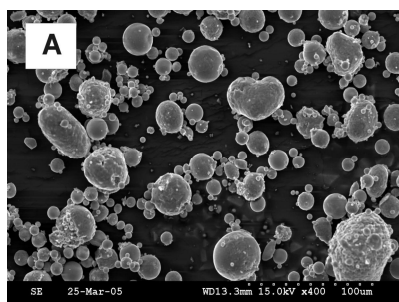
1. INTRODUCTION

Forming of solid metals and alloys can be carried out hot or cold. Hot solid forming comprises rolling, extrusion and stamping. After additional cold forming, strengthening of materials takes place and the products achieve better surface quality and dimensional accuracy. All processes are suitable for solid metals, but not all materials are equally suitable for processing by hot PM forming.

Particulate metal matrix composites are a special group of construction materials developed to improve stiffness, strength and additionally properties such as wear resistance. For metallic matrix composites, MMCs, casting and the PM route are used. For PM Al-based composites reinforced with solid particles, hot extrusion or hot pressing (consolidation) are suitable, especially when the particles do not react with the matrix. Processing using forging and extrusion of composites obtained using the PM route are described in [1, 2, 3]. Hot forming results in densification and, after cold working of the matrix, strengthening due to the reinforcing particles is in accord with the Orowan rule. The effects of extrusion of Al-X% SiC on density and mechanical properties have been reported [4]. Extruded products were densified to nearly theoretical density, but, to obtain better strengthening of the composites, cold processing is needed. The research concentrated on designing chemical composition, structure and properties [4, 5, 6]. The increase of the yield stress of light materials gives a new possibility to develop them as construction materials. The closed-die forming of gradient materials from powders of aluminum alloy basis and the extrusion PM Al-10% SiC composite and their cold drawing are presented in this paper.

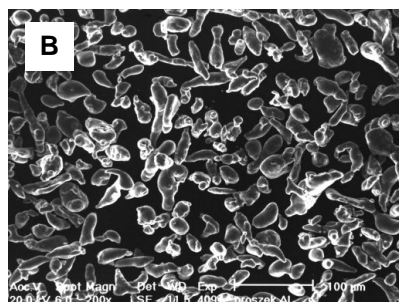
2. KUCIE MATRYCOWE NA GORĄCO MATERIAŁÓW GRADIENTOWYCH Z PROSZKÓW NA OSNWIIE ALUMINIUM

Materiałami wyjściowymi do badań były proszki aluminium RAI-1 oraz jego stopu Al17Si5Fe3Cu1,1Mg0,6Zr, oznaczonego jako Al17 (rys. 1). Przy wykorzystaniu metalurgii proszków, przeróbki plastycznej oraz obróbki cieplnej, zostały wytworzone materiały gradientowe. Dla tych materiałów wykonano badania mikrostruktury i właściwości. Do wykonania wyprasek przygotowano mieszanki proszków o zawartości masowej 20, 40, 60 i 80% proszku Al17 w osnowie aluminium. Proces mieszania proszków realizowano w mieszalniku dwustozkowym przez dwie godziny. Wypraski otrzymano przez prasowanie proszku aluminium i mieszanek na zimno. Do zawartości 60% Al17 prasowano na zimno wypraski o średnicy 35 mm stosując nacisk jednostkowy 150 MPa. Ponieważ procedura ta zakończyła się niepowodzeniem podczas prasowania mieszanki 80% Al17 i proszku Al17, wypraski zagęszczano w zamkniętych matrycach o średnicy 37 mm na gorąco, przy prawie stałej temperaturze narzędzia, temperaturze materiału 490°C i nacisku jednostkowym prasowania 120 lub 200 MPa. W takich samych warunkach prasowano na gorąco wypraski wykonane z pozostałych mieszanek. Gęstość litego aluminium wynosi 2,7 g/cm³, a stopu Al17 2,84 g/cm³. Końcowym zabiegiem było utwardzanie dyspersyjne składnika Al17. Próbkę zostały wygrzane w 490°C, schłodzone w wodzie i starzone przez 4 godziny w 180°C. Mikrostruktura materiałów po kształtowaniu na gorąco i obróbce cieplnej przedstawiona została na rys. 2. W tab. 1 podano gęstość, twardość, wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie, a także krytyczną wielkość odkształcenia przy ścisaniu.

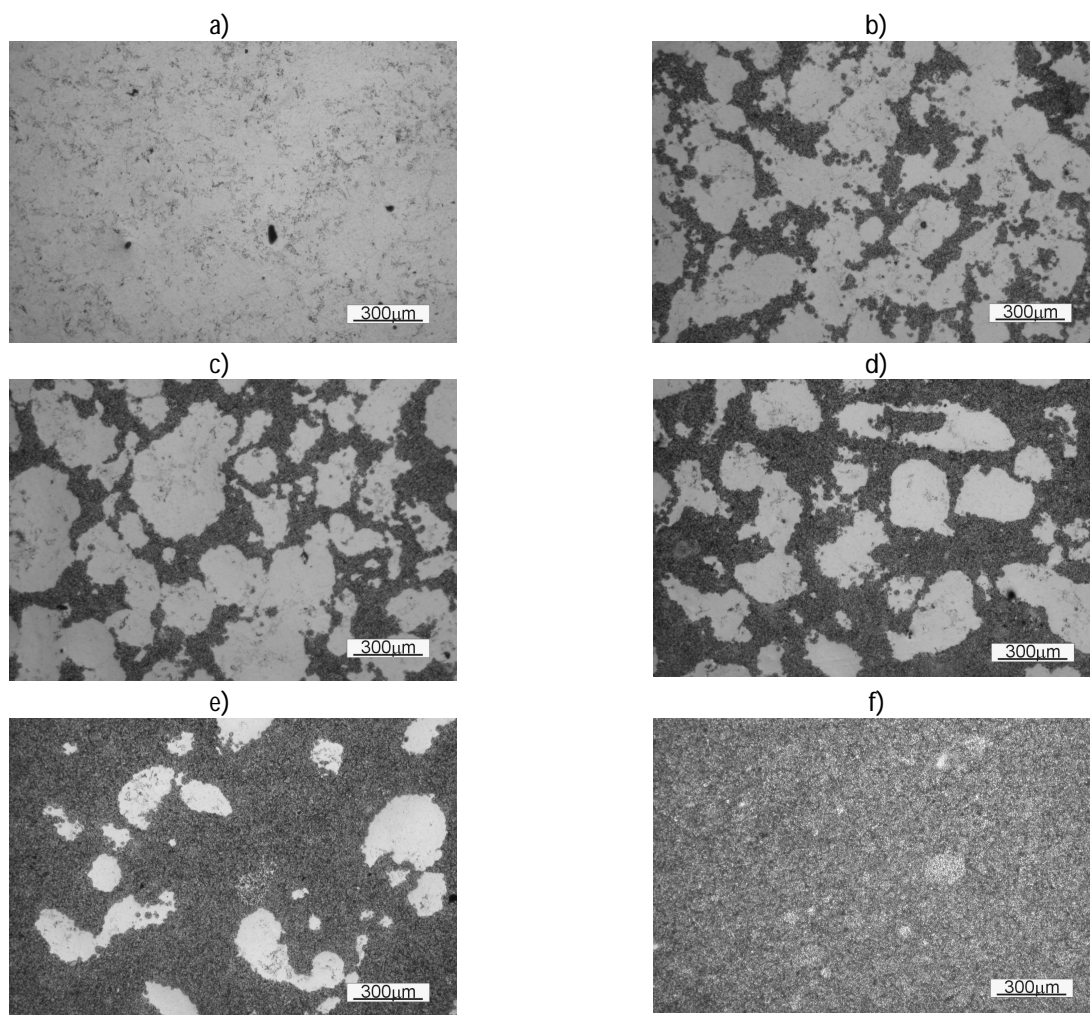


2. HOT CLOSED-DIE FORMED GRADIENT MATERIALS FROM POWDERS OF ALUMINIUM ALLOY BASIS

Starting materials were powders of aluminium RAI-1 and its alloy Al17Si5Fe3Cu1.1Mg0.6Zr, designated Al17, (fig.1). Using Powder Metallurgy and subsequent plastic work and heat treatment, gradient materials based on these powders were produced and examination of their structures and properties was carried out. Preforms, ranging in composition in 20 wt.% steps, were hot densified. Theoretical density of Al is 2,7 g/cm³, and of Al17 2,84 g/cm³. Double cone blending for two hours was used to obtain 20, 40, 60 and 80wt% Al17 and these mixes were closed die cold pressed. For up to 60% Al17, die diameter was 35 mm and uniaxial pressure 150 MPa. As this procedure was not successful for Al17 – 80% Al17, these preforms were further densified in closed dies of diameter 37 mm, in near isothermal conditions of tool and material temperature of 490°C and uniaxial pressure of 120 or 200 MPa. Finally, to age harden the Al17 constituent, samples were solution treated at 490°C, quenched into water and aged for 4h at 180°C. The microstructure of the materials after hot forming and heat treatment are shown in fig. 2. Density, hardness, tensile and compression strengths and critical strain during compression are given in tab. 1.



Rys. 1. Morfologia cząstek proszku: A – Stop Al17Si5Fe3Cu1,1Mg0,6Zr, B – aluminium
Fig. 1. Morphology of powder particles: A – Al17Si5Fe3Cu1,1Mg0,6Zr alloy, B – aluminium



Rys. 2. Mikrostruktura próbek uzyskanych z (a) proszku RAI-1, (f) proszku Al17 oraz mieszanin tych proszków: (b) Al- 20% Al17, (c) Al- 40% Al17, (d) Al- 60% Al17, (e) Al- 80% Al17

Fig. 2. Microstructures of samples obtained from (a) RAI-1 powder, (f) Al17 powder, and mixtures of these powders: (b) Al-20 wt% Al17, (c) Al-40 wt% Al17, (d) Al-60wt% Al17, (e) Al-80wt% Al17

Tab. 1. Właściwości składników materiału gradientowego po konsolidacji w 490°C i obróbce cieplnej
Tab. 1. Properties of the component of gradient material after consolidation at 490°C and heat treatment

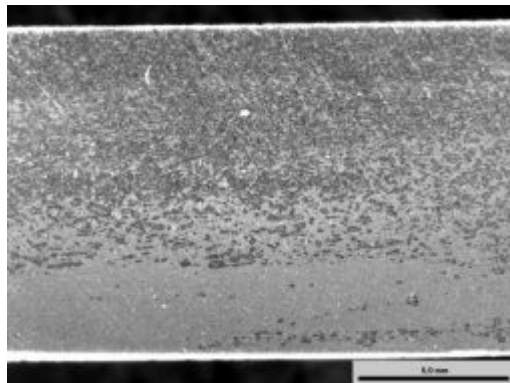
Materiał Material	Gęstość Density [g/cm ³]	Twardość Brinella Brinell hardness [HB]	Wytrzymałość na rozciąganie Tensile strength [Rm, MPa]	Wytrzymałość na ściskanie Compression strength [Rc, MPa]	Odształcenie krytyczne podczas ściskania Critical deformation during compression
Al.	2.74±0.01	34±1	107±10	—	—
Al-20% Al17	2.70±0.01	51±2	160±32	490	0.52
Al-40% Al17	2.73±0,01	72±2	214±29	470	0.20
Al-60% Al17	2.77±0.01	98±8	173±63	530	0.12
Al-80% Al17	2.79±0.01	136±3	219±56	620	0.09
Al17	2.83±0.01	168±4	176±102	800	0.09

2.1. Zachowanie materiału gradientowego podczas ściskania

Do ściskania wykonano próbki o smukłości $h_0/d_0=1,25$ (rys. 3), dla których zawartość Al17 zmieniała się w sposób ciągły od 20% do 100%. Próbki odkształcano siłą przyłożoną zarówno równolegle, jak i prostopadle do gradientu składu chemicznego (rys. 4). Zależności naprężenia rzeczywistego od odkształcenia przedstawiono na rys. 5. Należy zwrócić uwagę na to, iż wartości największe naprężenia σ_{rz} dla obciążenia prostopadłego do gradientu składu chemicznego są prawie dwukrotnie większe niż dla kierunku równoległego.

2.1. Gradient material behaviour during compression

Specimens with slenderness ratio $h_0/d_0=1,25$ were produced for Al17 compositions ranging continuously from 20 to 100% (fig. 3). Specimens were tested with composition gradient both parallel and perpendicular to the compressive axis (fig. 4). The true stress – true strain curves are plotted in fig. 5. It should be pointed out that the values of maximum stress σ_{rz} for perpendicular loading to the concentration gradient are approximately double those tested parallel.



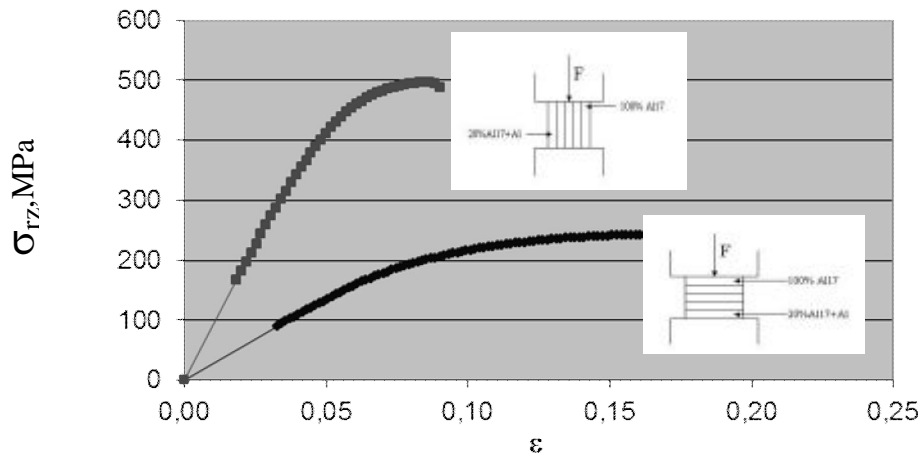
Rys. 3. Makrostruktura, przekrój wzdłużny po kształtowaniu na gorąco próbki z gradientem składu chemicznego

Fig. 3. Macrostructure, longitudinal section after hot forming of a specimen with a chemical composition gradient



Rys. 4. Próbki z materiału gradientowego po ściskaniu w temperaturze pokojowej siłą przyłożoną: A – prostopadle, B – równolegle do gradientu składu chemicznego

Fig. 4. Failed specimens of gradient material after compression at room temperature with stressing axis A – perpendicular, and B – parallel, to the chemical composition gradient



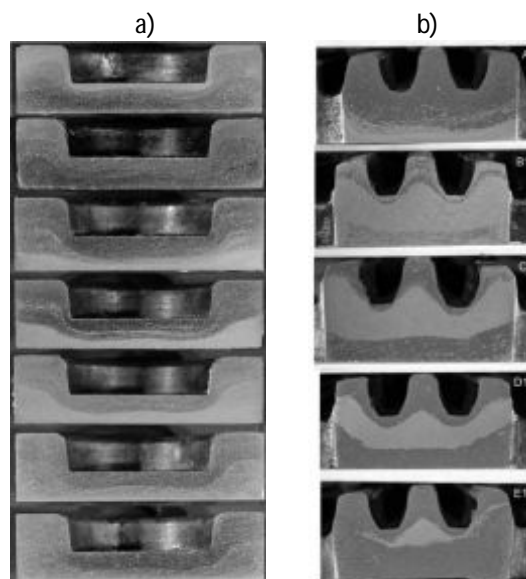
Rys. 5. Zmiana odkształcenia ε względem naprężenia rzeczywistego σ_{rz} podczas ściskania
 Fig. 5. Variation of the strain ε on the stress σ_{rz} in compression

2.2. Kucie materiałów gradientowych

Wypraski wykonano z mieszanek proszków o zmieniającej się zawartości proszku Al17 w sposób ciągły od 20% do 100%. Mieszanki umieszczono warstwami w matrycy i zagęszczono na zimno. Wypraski po nagraniu zostały kształtowane w matrycy zamkniętej. Przekroje produktów pokazano na rys. 6. Rys. 6a pokazuje płynięcie materiałów warstwowych z udziałem wyciskania przeciwbieżnego i spęczniania. Rys. 6b pokazuje przekrój odkuwek kół zębatach z wykonanych z warstwowych wyprasek. Makrostruktura pokazuje dobrą jakość materiałów; nie zaobserwowano porów ani pęknięć.

2.2. Forging of gradient materials

Preforms for Al17 compositions ranging continuously from 20 to 100% were put into the die and cold consolidated. After heating preforms were shaped in a closed-die. Cross sections of the products are shown in fig. 6. Fig 6a shows flow of layer materials when back extrusion and upsetting dominate during filling of the die. Fig. 6b shows cross – section of gear forgings from layer preforms. Macrostructure shows good quality of materials; no pores or cracks are observed.



Rys. 6. Przekrój próbek otrzymanych z wyprasek warstwowych o zawartości Al17 od 20% do 100%: a – wyciskanych przeciwbieżnie w matrycy, b – typu koła zębata [7]

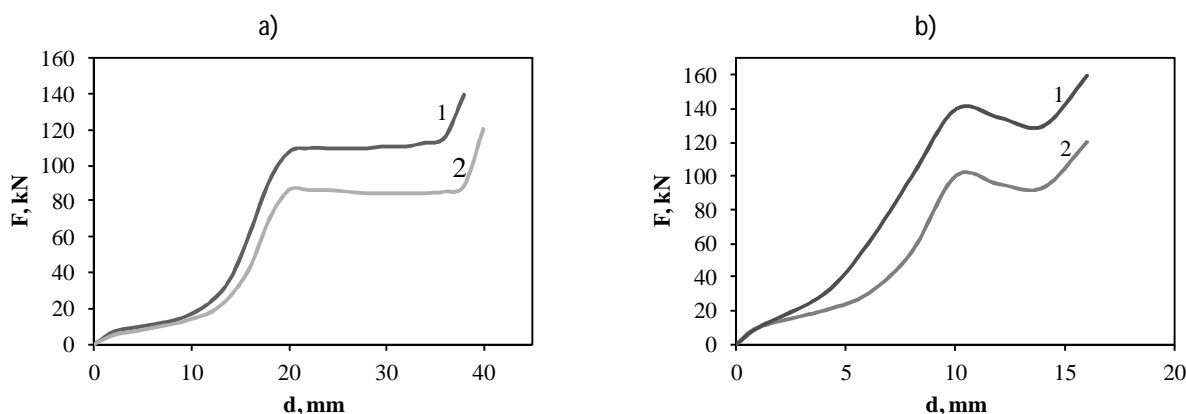
Fig. 6. Cross-section of sample from layer produced for Al17 compositions ranging from 20 to 100%: a – back extruded in die, b – gears [7].

3. Wyciskanie i ciągnięcie aluminium i kompozytu Al-SiC_{particle}

Wypraski wykonano z proszku aluminium RAl-1 oraz mieszanki tego proszku z 10% cząstek SiC przez prasowanie na zimno z naciskiem jednostkowym 80 MPa. Masa wyprasek wynosiła 75g, średnica 35,5 mm, a ich gęstość $\sim 1,95 \text{ g/cm}^3$. Wyciskanie wyprasek zostało wykonane w 480°C na prasie hydraulicznej, przy kącie matrycy 90° i współczynniku wyciskania 4,2 lub 10,41. Po podgrzaniu w 480°C przez 10 minut, próbki były wyciskane w warunkach izotermicznych. Średnice produktów wyciskanych wynosiły odpowiednio 18 mm lub 11 mm. Zmiany siły w zależności od przemieszczenia stempla podczas wyciskania wyprasek z aluminium i Al-10%SiC przedstawiono na rys. 7.

3. Extrusion and drawing of aluminum and Al-SiC_{particle} composite

The preforms from aluminum powder RAl-1 and mixture of this powder with 10% SiC particles were cold pressed at 80 MPa. The mass of the preforms was 75g, diameter of 35.5 mm and their density $\sim 1.95 \text{ g/cm}^3$. Extrusion of preforms was carried out at 480°C on a hydraulic press, with 90° die angle with the ratio 4.2 or 10.41. After heating at 480°C for 10 minutes, the specimens were extruded in isothermal conditions. The diameters of the extruded products were 18 or 11 mm, respectively. Changes of force vs. punch displacement for Al and Al-10%SiC preforms during extrusion are shown in fig. 7.



Rys. 7. Zmiana siły F w zależności od przemieszczenia stempla d podczas wyciskania wypraski w 480°C przy współczynniku wyciskania a – $\lambda=4,2$ oraz b – $\lambda=10,41$ dla: 1 – mieszanka proszków Al-10%SiC, 2 – aluminium RAl-1

Fig. 7. Force F vs. punch displacement d during extrusion of preforms at 480°C with ratio a – $\lambda=4.2$ and b – $\lambda=10.41$ for: 1– powder mixture Al-10%SiC, 2 – RAl-1 PM

Skład chemiczny wypraski oraz współczynniki wyciskania wpływały na przebieg zależności siły od przemieszczenia stempla oraz jej wartość. Na krzywych przedstawionych na rys. 7 widoczne są trzy etapy: pierwszy – zagęszczanie i wypełnianie matrycy, drugi – płynięcie materiału przez część kalibrującą matrycy pod wpływem prawie stabilnej siły oraz trzeci – wzrost siły przy małym przemieszczeniu stempla. Siła podczas wyciskania wyprasek Al-10% SiC w etapie ustalonym jest ok. 30% wyższa niż dla aluminium otrzymanego z proszku. Gęstość wyrobu po wyciskaniu jest prawie równa gęstości materiału litego.

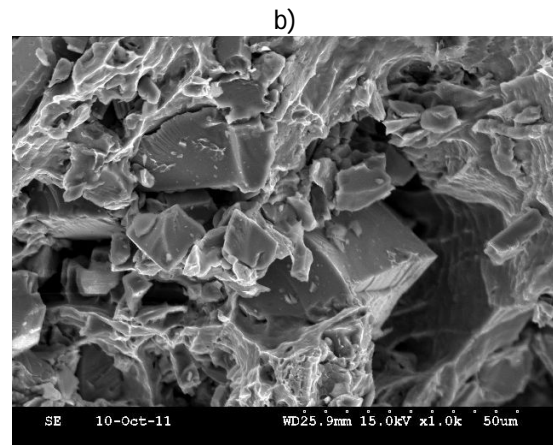
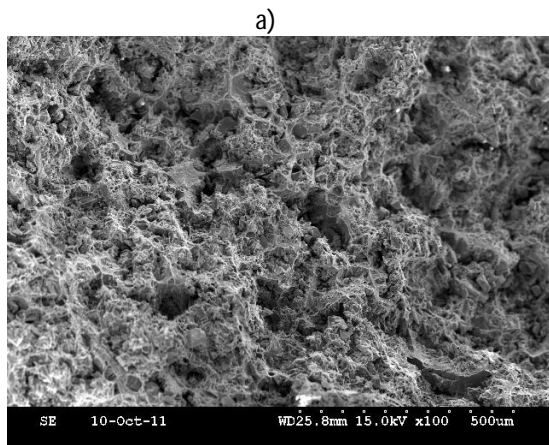
The chemical composition of the preforms and extrusion ratios influenced the force – punch displacement relationship and the value of the extrusion force. Three stage are visible on the fig. 7 curves: the first – consolidation and die container filling, second – flow of the material through the sizing zone of the die by the nearly stable force and the third – increase of the force by a small displacement. The force during extrusion of Al-10% SiC at the steady state of the flow is ca. 30% higher than for PM aluminum. The density of products after extrusion is nearly of solid materials.

3.1. Fraktografia

Powierzchnię zniszczenia powstałą podczas rozciągania próbek Al-10% SiC obserwowano z użyciem skaningowego mikroskopu elektronowego. Na rys. 8 i 9 przedstawiono morfologię powierzchni z widocznymi obszarami pęknięcia z udziałem plastycznego odkształcenia, jak i kruchego pęknięcia zarówno dla próbek wyciskanych ze współczynnikiem $\lambda = 4,2$ jak i $\lambda = 10,41$. Widoczne są też cząstki SiC zlokalizowane w osnowie aluminium i małe wgłębieniach, co jest prawdopodobnie wynikiem wypadania cząstek SiC na skutek dekohezji na granicach ziaren.

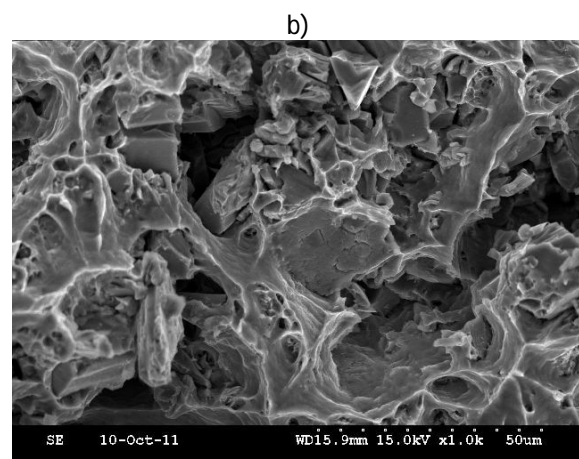
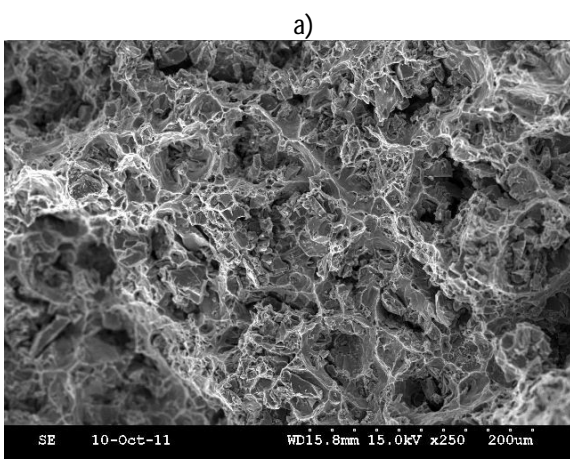
3.1. Fractography

The failure surfaces of Al-10% SiC tensile specimens were observed on a SEM and fig. 8 and 9 show both plastic and brittle regions for extrusion ratios $\lambda = 4.2$ and 10.41 , respectively. SiC particles located in the aluminum matrix and small cavities, probably as a result some such SiC particles falling out due to boundary decohesion, are visible.



Rys. 8. Powierzchnia zniszczenia materiału Al-10% SiC wyciskanego przy współczynniku 4,11 w 485°C

Fig. 8. Failure surface of Al-10% SiC material extruded with ratio 4.11 at 485°C



Rys. 9. Powierzchnia zniszczenia materiału Al-10% SiC wyciskanego przy współczynniku 10,41 w 485°C

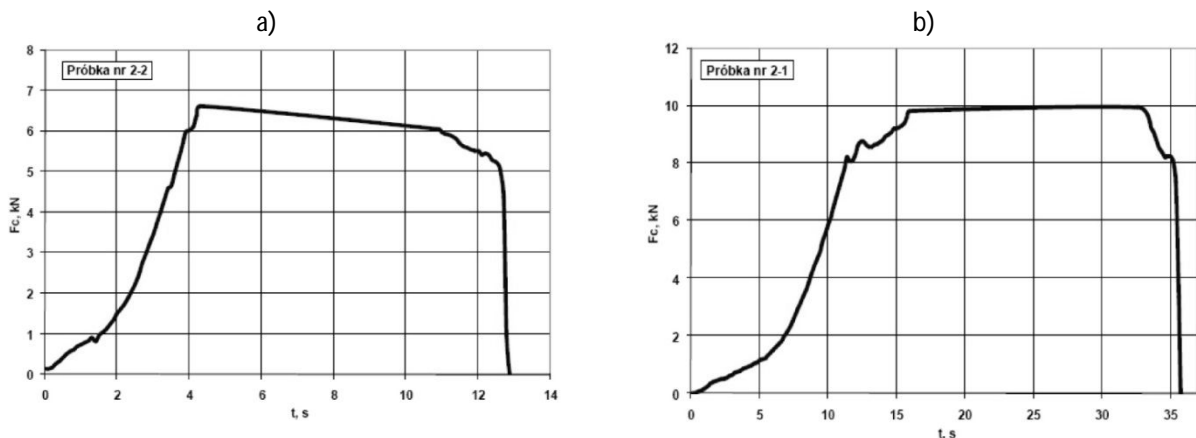
Fig. 9. Failure surface of Al-10% SiC material extruded with ratio 10.41 at 485°C

3.2. Ciągnięcie wyciskanych próbek Al oraz Al-10%SiC

Ciągnięcie wyciskanych próbek Al oraz Al-10%SiC przeprowadzono na ciągarce ławowej; średnica oczka ciągadła wynosiła 16 mm (odkształcenie logarytmiczne φ_r wynosiło 0,09). Na rys. 10a przedstawiono przebieg siły w czasie podczas ciągnięcia próbek otrzymanych przez wyciskanie wykonanych z proszku aluminium oraz mieszanki Al-10%SiC. Siła ciągnięcia jest ok. 3,5 kN większa dla próbek Al-10%SiC niż dla próbek aluminium.

3.2. Drawing of PM Al and Al-10%SiC extruded samples

Drawing of Al and Al-10% SiC specimens was performed on a draw bench; the diameter of the drawing die was 16 mm (logarithmic strain φ_r was 0.09). Force vs. time during drawing is shown in fig. 10a for PM aluminum and fig. 10b for PM Al-10%SiC specimens, respectively. Drawing force is circa 3.5 kN higher for Al-10%SiC specimens than for aluminum specimens.



Rys. 10. Przebieg siły ciągnięcia w czasie dla a) próbki Al, b) próbki Al-10%SiC, redukcja średnicy z 17,5mm do 16mm ($\varphi_r = 0,09$)

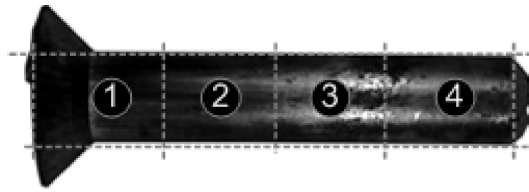
Fig.10. Drawing force vs. time for a) Al specimen, b) Al-10%SiC specimen, reduction of diameter from 17.5 mm to 16 mm ($\varphi_r = 0.09$)

3.3. Próba ściskania

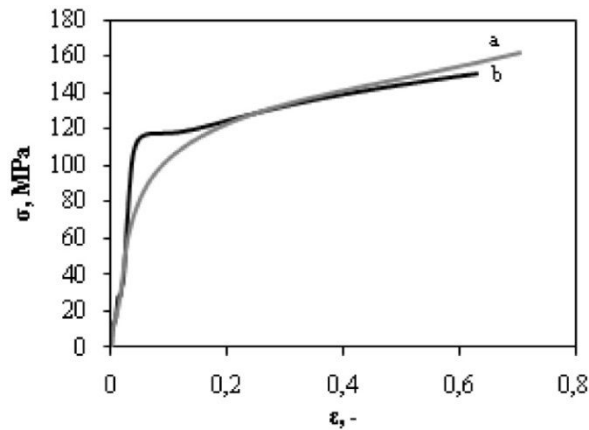
Dla porównania właściwości materiału po wyciskaniu oraz wyciskaniu i ciągnięciu, wykonana została próba ściskania osiowego. Próbki pobrane zostały z obszaru 1 produktów wyciskanych (rys. 11). Smukłość h_0/d_0 wynosiła 1. W ten sam sposób pobrane zostały próbki z materiałów ciągniętych. Prędkość ściskania wynosiła 0,15 mm/s. Zależność naprężenia od odkształcenia dla materiału przed i po ciągnięciu przedstawiona została na rys. 12 i 13.

3.3. Compression testing

In order to compare material properties after extruding and extruding and drawing, the axial compression test was used. The specimens were taken from region 1 of the extruded products (fig.11). The slenderness ratio, h_0/d_0 , was 1. In the same way the specimens from the drawn materials were taken. The compression rate was 0.15mm/s. Stress-strain relationships for the extruded material before and after drawing are shown in fig. 12 and 13.

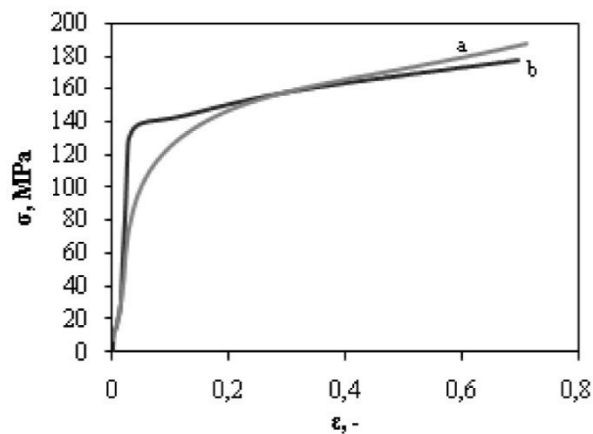


Rys. 11. Próbkę wyciskana z oznaczeniami obszarów, z których pobrane zostały próbki do ściskania.
 Fig.11. Extruded sample with marked sites from which specimens were taken for compression testing.



Rys. 12 Porównanie zależności naprężenie – odkształcenie dla aluminium: a – wyciskanego, b – wyciskanego i ciągniętego ($\varphi_r=0,09$) (próbki pobrane z obszaru 1, rys. 11)

Fig. 12. Comparison of strain – stress relationships for PM aluminium: a – extruded, b – extruded and drawn ($\varphi_r=0.09$) (specimens taken from site 1, fig. 11)



Rys. 13. Porównanie zależności naprężenie – odkształcenie dla materiału Al-10%SiC: a – po wyciskaniu, b – po wyciskaniu i ciągnięciu ($\varphi_r=0.09$) (próbki pobrane z obszaru 1, rys. 11)

Fig.13. Comparison of stress – strain relationships for Al-10%SiC material: a – after extrusion, b – after extrusion and drawing ($\varphi_r=0.09$) (specimens taken from site 1, fig.11)

Po wyciskaniu granica plastyczności dla aluminium zawiera się w zakresie od 74 do 79 MPa, dla Al-10%SiC jest to zakres od 86 do 100 MPa. Po ciągnięciu jest wyższa i ma wartości od 114 do 118 MPa dla aluminium oraz 130 do 133 MPa dla kompozytu Al-10% SiC.

After extrusion the yield stress for the Al PM material is in the range of 74 to 79 MPa and for the Al-10%SiC material in the range of 86 to 100 MPa. After drawing it is higher and has values of 114 to 118 MPa for Al material and 130 to 133 MPa for the Al-10% SiC composite.

4. WNIOSKI

W wyniku obróbki na gorąco preform Al-Al17Si5Fe3Cu1.1Mg0.6Zr uzyskana została prawie pełna gęstość. Wraz z zastosowaniem w osnowie aluminium materiału Al17Si5Fe3Cu1,1Mg0,6Zr, zaobserwowano wzrost wytrzymałości na rozciąganie oraz ściskanie. Z drugiej strony zmniejsza się plastyczność, mierzona odkształceniem krytycznym podczas ściskania. W materiałach gradientowych widoczna jest anizotropia wytrzymałości na ściskanie. Wytrzymałość na ściskanie przy obciążeniu prostopadle do gradientu składu chemicznego wytrzymałość na ściskanie jest dwa razy większa w porównaniu wytrzymałości przy obciążeniu równoległe do gradientu.

Wyniki wyciskania na gorąco oraz ciągnięcia materiałów Al oraz Al-10%SiC, wykonanych z proszków pokazują możliwość wytwarzania wyrobów o gęstości zbliżonej do gęstości materiałów litych oraz użytecznych cechach wytrzymałościowych. Granica plastyczności (ściskanie) aluminium i kompozytu Al-10% SiC po ciągnięciu jest wyższa niż po wyciskaniu o ok. 40 MPa.

Podziękowania

Doświadczalna część niniejszego badania stanowi część badań realizowanych w ramach programu Prac Statutowych AGH w 2014 r.

4. CONCLUSIONS

Nearly full density was attained as a result of hot working of the Al-Al17Si5Fe3Cu1.1Mg0.6Zr preforms. An increase in tensile and compression strengths resulting from the incorporation of Al17Si5Fe3Cu1.1Mg0.6Zr in the Al matrix is observed. Concurrently there are decreases in plasticity, as measured by critical compression strains. In gradient materials there was a pronounced anisotropy in compressive strength. Testing perpendicularly to the concentration gradient resulted in approximately double values compared to testing parallel to the gradient.

Hot extrusion and drawing of Al and Al-10% SiC PM materials has shown a manufacturing possibility of obtaining products with nearly full density and useful strength properties. The yield stress (compression) for the Al and Al-10%SiC PM material after drawing as a result of cold working of the matrix is higher than of the extruded one by about 40 MPa.

Acknowledgements

The experimental part of this research forms part of the AGH Statutory Work Programme in the year 2014.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Szczepanik S.: *Przeróbka plastyczna materiałów spiekanych z proszków i kompozytów*. AGH UWN-D, Kraków 2003.
- [2] Szczepanik S., Raßbach S.: *Hot forming of aluminium based gradient materials*. ESAFORM the 5th International Conference on Material Forming, Kraków, s. 335–338.
- [3] Szczepanik S., Lehnert W.: *The formability of the Al-5%SiC composite obtained using P/M method*. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 80 (1996) s. 703–709.
- [4] Szczepanik S., Wojtaszek M., Nikiel P., Krawiarz J.: *Wybrane własności kompozytów na osnowie proszku aluminium, umocnionych cząstkami SiC, otrzymanych przez wyciskanie na gorąco*. *Rudy i Metale Nieżelazne* R. 57 nr 12 (2012) s. 857–863.
- [5] Mordike B.I., Keiser K.U.: *Bauteile aus pulvermetallurgisch hergestellten Leichtmetall-Kurzfaserverbundwerkstoffen*. *Neue Werkstoffe*, Band I VDI Berichte 670 (1988) s. 285–300.
- [6] Szczepanik S., Krawiarz J.: *Struktura i wybrane własności kompozytu z gradientem składu chemicznego otrzymanego z proszku aluminium i stopu Al-Si-Fe-Cu-Mg*. *Kompozyty* vol. 8 nr 4 (2008) s. 367–374.
- [7] Polish research grant No N507 093 32/2562. Project manager: S. Szczepanik.

