



Wybrane własności mechaniczne wyciskanych i ciągnionych kompozytów Al-SiC_p otrzymanych z proszków

Some mechanical properties of extruded and drawn powder metallurgy Al-SiC_p composites

(1) Piotr Nikiel*  (2) Stefan Szczepanik (3) Piotr Bednarczyk

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Katedra Plastycznej Przeróbki Metali, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 21.02.2018

Recenzja: 6.03.2018

Akceptacja: 29.03.2019

Wkład autorów

- (1) Koncepcja badań, wytworzenie materiału, przeprowadzenie badań własności, opracowanie i analiza wyników badań, przygotowanie artykułu
- (2) Koncepcja badań, analiza wyników badań, przygotowanie artykułu
- (3) Wytworzenie materiału, przeprowadzenie badań własności

ORCID iD

- (1) <https://orcid.org/0000-0002-6482-9753>

Streszczenie

Przedstawiono wyniki badań wpływu wielkości odkształcenia na zimno, zadanego podczas ciągnięcia, na własności mechaniczne kompozytów na osnowie aluminium wzmocnianego cząstkami SiC. Materiały do badań wytworzono w procesie wyciskania na gorąco wyprasek otrzymanych przez prasowanie na zimno mieszanek proszków Al i SiC. Udział objętościowy cząstek SiC wynosił 5 i 10%. Dla porównania badanych własności wytworzono także próbki tylko z proszku aluminium. Odkształcenie na zimno aluminium i wytworzonych kompozytów realizowano w procesie ciągnięcia, po przetoczeniu próbek ze średnicy 18 mm na średnicę 17 mm. Ciągnięcie przeprowadzono na ciągarce ławowej z zastosowaniem oczek ciągarskich o średnicach 16, 14 i 12,2 mm. Własności mechaniczne wytworzonych materiałów badano w stanie po wyciskaniu oraz po każdym przejściu w procesie ciągnięcia. Granica plastyczności aluminium i kompozytów Al-SiC w stanie po wyciskaniu jest porównywalna i zawiera się w przedziale 60–66 MPa. Podobnie jest w przypadku wytrzymałości na rozciąganie tych materiałów, która wyniosła 82–94 MPa. W rezultacie zastosowanego ciągnięcia wytworzonych materiałów uzyskano znaczny wzrost granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie oraz twardości, który jest zależny od wielkości odkształcenia na zimno. Granica plastyczności aluminium po ciągnięciu na średnicę 12,2 mm wzrosła z 60 do 132 MPa, a kompozytów Al-5SiC i Al-10SiC wzrosła odpowiednio z 65 do 146 MPa i z 66 do 140 MPa. Wytrzymałość na rozciąganie aluminium po ciągnięciu na najmniejszą średnicę wzrosła z 94 do 139 MPa, a kompozytów o zawartości 5% i 10% SiC wzrosła odpowiednio z 93 do 149 MPa i z 82 do 136 MPa. Wprowadzenie cząstek SiC do aluminiowej osnowy o twardości 23 HV spowodowało wzrost twardości do wartości powyżej 29 HV, a po ciągnięciu na 12,2 mm twardość wzrosła do 43 i 46 HV odpowiednio dla materiałów o zawartości 5 i 10% SiC.

Słowa kluczowe: proszek aluminium, proszek węgla krzemu, kompozyty Al-SiC, wyciskanie, ciągnięcie, umocnienie, własności mechaniczne

Article info

Received: 21.02.2018

Reviewed: 6.03.2018

Accepted: 29.03.2019

Authors' contribution

- (1) Research concept, specimen preparation, mechanical testing, development and

Abstract

The effects of cold drawing on mechanical properties of Al-(5 and 10%)SiC composites, manufactured by hot extrusion of cold pressed powder mixture preforms, are reported. To assess the effect of SiC powder additions, similarly processed aluminium powder specimens were tested. The drawing was of 17 mm diameter machined extruded rods on a chain drawn bench with 16, 14 and 12.2 mm diameter dies. Tensile and compressive properties were investigated after extrusion and after each pass of the drawing process. The yield stress of aluminium and Al-SiC composites after extrusion is comparable and is in the range 60–66 MPa. Similarly is, in the case of the tensile strength of these mate-

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 12 617 38 46; Fax: +48 12 617 33 39; e-mail: pnikiel@metal.agh.edu.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 12 617 38 46; Fax: +48 12 617 33 39, e-mail: pnikiel@metal.agh.edu.pl

- analysis of test results, manuscript preparation*
 (2) *Research concept, analysis of test results, manuscript preparation*
 (3) *Specimen preparation, mechanical testing*

ORCID iDs

- (1) <https://orcid.org/0000-0002-6482-9753>

rials, which was 82-94 MPa. As a result of the drawing process, a significant increase in yield strength, tensile strength and hardness was obtained, dependent on the strain during drawing. The yield strength of aluminum after drawing to a diameter of 12.2 mm increased from 60 to 132 MPa and for composites Al-5SiC and Al-10SiC increased respectively from 65 to 146 and from 66 to 140 MPa. The tensile strength of aluminum after drawing to the smallest diameter increased from 94 to 139 MPa, and for composites with 5% SiC and 10% SiC increased from 93 to 149 and from 82 to 136 MPa, respectively. The addition of 5 and 10% SiC particles to the aluminum matrix increase the hardness from 23 to values above 29 HV and after drawing to a diameter 12.2 mm, it increased to 43 and 46 HV for material with 5 and 10% SiC, respectively.

Keywords: *aluminium powder, SiC particles, Al-SiC composites, extrusion, drawing, strengthening, mechanical properties*

1. WSTĘP

Kompozyty na osnowie aluminium i jego stopów są grupą materiałów o dużym potencjale zastosowania między innymi w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym czy kosmicznym, co wynika z ich dobrej kombinacji własności, które są nieosiągalne dla konwencjonalnych materiałów. Wprowadzenie do aluminium czy stopów aluminium ceramicznych cząstek powoduje przy zachowaniu niskiej gęstości, zwiększenie ich wytrzymałości, sztywności czy odporności na ścieranie.

Kompozyty umacniane cząstkami mogą być wytwarzane metodami odlewniczymi lub metodami metalurgii proszków [1], a ich przetwórstwo może być realizowane metodami przeróbki plastycznej, np. kucie [2], wyciskanie [3, 4] czy walcowanie [5]. Jako cząstki umacniające osnowę wprowadza się między innymi SiC, Al₂O₃, B₄C, TiC, TiB₂.

Własności mechaniczne kompozytów metalicznych umacnianych cząstkami mogą być kontrolowane przez rodzaj, udział objętościowy i wielkość zastosowanych cząstek. Wpływ rodzaju zastosowanych cząstek na własności, między innymi na wytrzymałość na rozciąganie, twardość został przedstawiony w pracach [6–7] natomiast wpływ udziału i wielkości cząstek na te własności przedstawiono w pracach [8–10].

Dodatkowy efekt umocnienia kompozytu może być uzyskany przez odkształcenie na zimno.

W pracach [11–12] przedstawiono wyniki badań własności mechanicznych kompozytów Al-SiC po procesie przeciskania przez kanał kątowny (ECAP – Equal Channel Angular Pressing),

1. INTRODUCTION

Composites based on the matrix of aluminium and its alloys have a high potential for application in the automotive, aviation and space industries, which results from their good combination of properties, unobtainable for conventional materials. The addition of ceramic particles to aluminum or aluminum alloys increases strength, stiffness and abrasion resistance, maintaining low density.

Composites reinforced by particles can be manufactured by foundry or powder metallurgy methods [1], and their processing continued by mechanical working, e.g. forging [2], extrusion [3, 4] or rolling [5]. Among others, SiC, Al₂O₃, B₄C, TiC, TiB₂ particles are used to strengthen the matrix.

Mechanical properties of metal matrix composites reinforced by particles can be considered by type, content and size of particles. Effect of particles type on yield strength and hardness was analyzed in [6, 7], and the effect of content and particles size in [8–10].

Additional reinforcing effect in composites can be obtained by cold deformation.

In [11–12] results of mechanical properties have been reported for Al-SiC composites after equal channel angular pressing, ECAP, and in [13] and for Al-Al₂O₃ composites after application

a w pracy [13] kompozytów Al-Al₂O₃ po procesie walcowania pakietowego (ARB – *Accumulative Roll Bonding*). W procesach tych generowane są bardzo duże odkształcenia plastyczne, jednak efekt umocnienia odkształceniowego kompozytów może być otrzymany w wyniku zastosowania konwencjonalnych metod procesów przeróbki plastycznej, jak walcowanie czy ciągnięcie.

W ramach tej pracy przeprowadzono badania, które miały na celu określenie wpływu wielkości odkształcenia na zimno kompozytów Al-SiC, wytworzonych metodą metalurgii proszków na ich własności mechaniczne.

2. WYTWORZENIE MATERIAŁU

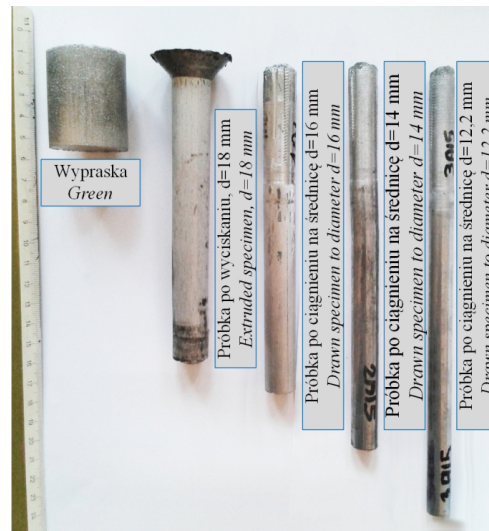
Kompozyty na osnowie aluminium wzmocniane cząstkami SiC wykonano z proszków poprzez prasowanie na zimno i wyciskanie na gorąco. W celu porównania własności wykonano próbki bez cząstek wzmocniających. Do badań użyto rozpylany proszek aluminium i cząstki węgla krzemu o frakcji F800. Mieszanki proszku aluminium i fazy wzmocniającej przygotowano w mieszalniku dwustopniowym. Udział objętościowy fazy wzmocniającej wynosił 5 i 10%. Prasowanie na zimno proszku aluminium oraz przygotowanych mieszanek zostało przeprowadzone na prasie hydraulicznej z naciskiem jednostkowym 80 MPa. Wytworzono wypraski o średnicy 35,4 mm i masie ~100 g, których gęstość wynosiła około 2 g/cm³. Proces wyciskania współbieżnego wyprasek realizowano na prasie hydraulicznej w temperaturze 480°C, z użyciem narzędzi o średnicy oczka 18 mm. Przed procesem ciągnięcia wyciśnięte próbki zostały przetoczone na średnicę 17 mm. Ciągnięcie przeprowadzono na ciągarce ławowej, stosując oczka ciągarskie o średnicy 16, 14 i 12,2 mm. Zdjęcie próbek po poszczególnych etapach wytwarzania i przetwarzania przedstawiono na rys. 1.

of Accumulative Roll Bonding, ARB. In these processes very large plastic deformations are generated, however the effect of deformation strengthening of composites can be obtained as a result of using conventional methods of metal forming, such as rolling or drawing.

In this work investigation of the effect of cold deformation of Al-SiC composites, produced by powder metallurgy, on mechanical properties was carried out.

2. PREPARATION OF MATERIALS

Aluminum and aluminium matrix composites reinforced by SiC particles were manufactured from powders by cold pressing and hot extrusion of greens. Atomized aluminum powder and silicon carbon particles with a fraction F800 were used with 5 and 10% volume fractions of the reinforcing phase. The cold pressing of aluminum powder and prepared mixtures was carried out on a hydraulic press with a unit pressure of 80 MPa. Greens with a diameter of 35.4 mm and a weight of ~100 g were prepared with densities of about 2 g/cm³. The process of forward extrusion of greens was carried out on a hydraulic press at 480°C, using die with a hollow diameter of 18 mm. Before the drawing process, the extruded specimens were machined to 17 mm diameter. Drawing was carried out on a chain drawbench. The picture of specimens after particular stages of processing is shown in Fig. 1.



Rys. 1. Próbkę po kolejnych etapach wytwarzania

Fig. 1. Specimens after subsequent processing steps

Zestawienie etapów ciągnięcia wraz z parametrami odpowiadającymi poszczególnym przejściom (tj. współczynnik wydłużenia λ , logarytmiczne odkształcenie promieniowe δ_r) zamieszczono w tab. 1.

The list of carried out drawing passes with the parameters corresponding to individual passes, i.e. the elongation factor λ , the logarithmic radial strain δ_r is given in Tab. 1.

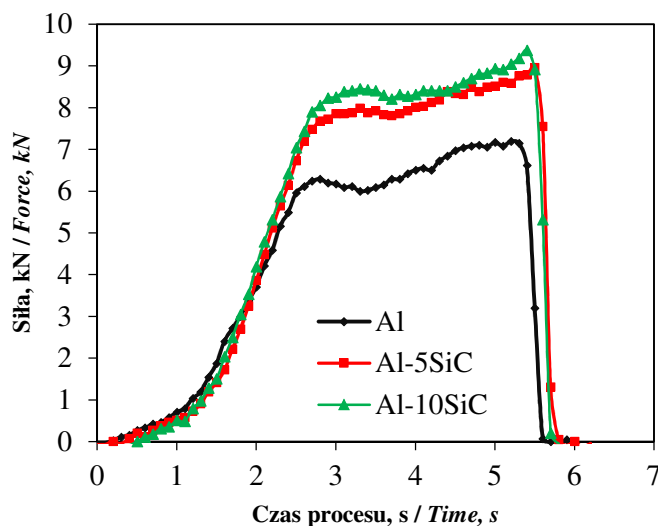
Tab 1. Etapy ciągnięcia i obliczone wartości współczynnika wydłużenia i logarytmicznego odkształcenia promieniowego po każdym przejściu

Tab. 1. The steps of drawing and calculated values of the elongation factor and logarithmic radial strain after each pass of drawing

Material Material	Proces Process	*Współczynnik wydłużenia λ , – *Elongation factor λ , –	**Logarytmiczne odkształcenie promieniowe δ_r , – **Logarithmic radial strain δ_r , –
Al, Al-5SiC, Al-10SiC	Ciągnięcie na średnicę 16 mm Drawing to a diameter of 16 mm (17,0->16,0 mm)	1,13	-0,06
	Ciągnięcie na średnicę 14 mm Drawing to a diameter of 14 mm (17,0->16,0->14,0 mm)	1,47	-0,19
	Ciągnięcie na średnicę 12,2 mm Drawing to a diameter of 12.2 mm (17,0->16,0->14,0->12,2 mm)	1,94	-0,33
* $\lambda = S_0/S_1$ gdzie S_0 – przekrój wyjściowy, S_1 – przekrój po ciągnięciu * $\lambda = S_0/S_1$ where S_0 – initial cross-section, S_1 – cross-section after drawing ** $\delta_r = \ln r_0/r_1$ gdzie r_0 – promień wyjściowy, r_1 – promień po ciągnięciu ** $\delta_r = \ln r_0/r_1$ where r_0 – initial radius, r_1 – radius after drawing			

Podczas procesu rejestrowano zmianę siły w czasie. Wyniki zamieszczono na rys. 2.

The drawing force was recorded and the results of force versus time are shown in Fig. 2.



Rys. 2. Wykres zmiany siły ciągnięcia w funkcji czasu dla aluminium i kompozytów Al-SiC; zmiana średnicy z 17 na 16 mm

Fig. 2. Drawing force vs. time for aluminium and Al-SiC composites; reduction of diameter from 17 to 16 mm

Najniższe wartości siły 6–7 kN zarejestrowano podczas ciągnięcia czystego aluminium. Większe wartości 8–9 kN zarejestrowano podczas ciągnięcia kompozytów, co jest związane ze zwiększeniem tarcia, wynikającego z obecności cząstek SiC.

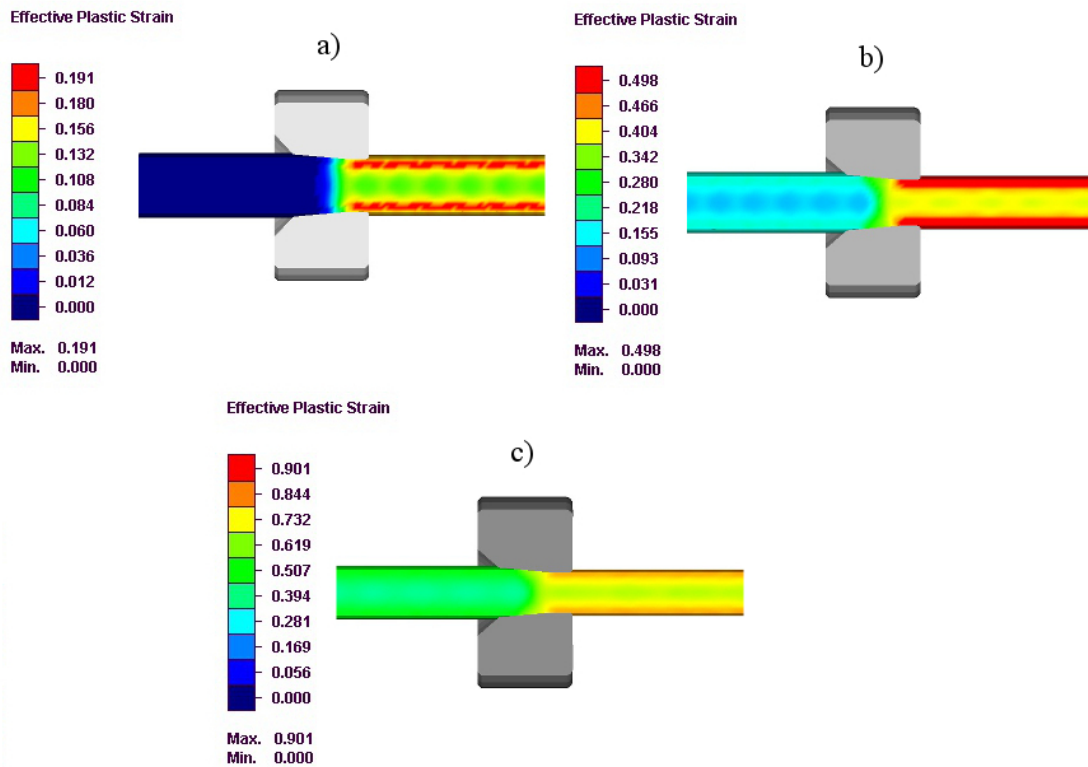
The lowest values of force 6–7 kN occurred during drawing of pure aluminium. Larger values of 8–9 kN, were recorded during drawing of composites, which is related to the addition of SiC particles to the aluminium matrix causing a rise in friction.

3. ANALIZA NUMERYCZNA PROCESU CIĄGNIENIA

Symulacja numeryczna MES miała na celu obliczenie rozkładu odkształcenia w ciągniętych aluminiowych próbkach. Obliczenia przeprowadzono w programie Simufact Forming, a warunki brzegowe symulacji odpowiadały warunkom rzeczywistym procesu. Wyniki symulacji przedstawiono na rys. 3, a na rys. 4 przedstawiono zmianę intensywności odkształcenia występującą od osi próbki do jej powierzchni, po każdym przejściu w procesie ciągnięcia.

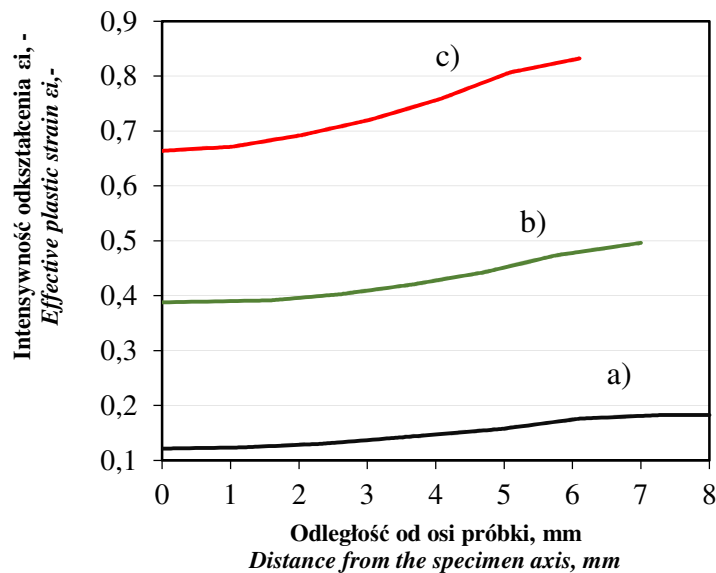
3. NUMERICAL ANALYSIS OF THE DRAWING PROCESS

The numerical analysis of FEM was aimed at calculating the strain distribution in drawn aluminum specimens. Calculations were carried out in Simufact Forming program. Boundary conditions corresponded to the real conditions of the process. Results of calculations are shown in Fig. 3. Changes in strain intensity occurring from the axis of the specimen to its surface, after each pass in the drawing process, is shown in Fig. 4.



Rys. 3. Rozkład intensywności odkształcenia w materiale po ciągnięciu ze średnicy 17 mm na średnicę: a) 16, b) 14 i c) 12,2 mm, obliczony na przekrojach wzdłużnych

Fig. 3. Effective plastic strain distribution after drawing from 17 mm diameter to: a) 16, b) 14 and c) 12.2 mm diameter, calculated on longitudinal section



Rys. 4. Zmiana intensywności odkształcenia w materiale w kierunku od osi próbki do powierzchni, po ciągnięciu na średnicę: a) 16, b) 14 i c) 12,2 mm

Fig. 4. Changes of effective plastic strain from the axis of the specimen to its surface, after drawing on diameter: a) 16, b) 14 and c) 12.2 mm

Dla materiałów ciągnionych, największa intensywność odkształcenia lokalizuje się przy powierzchni próbki. Maksymalne wartości intensywności odkształcenia wyniosły ponad 0,18, 0,47 i 0,84 po ciągnięciu na średnice odpowiednio 16, 14, 12,2 mm. Niejednorodność odkształcenia zwiększa się z kolejnymi ciągami, co wynika z coraz większej różnicy pomiędzy wartościami intensywności odkształcenia w osi próbki i przy powierzchni.

4. BADANIA WŁASNOŚCI

4.1. Metody badawcze

Mikrostrukturę obserwowano na mikroskopie Leica DM4000M. Analizę mikrostruktury przeprowadzono na przekrojach wzdłużnych i poprzecznych próbek. Mikrostrukturę aluminium wytrawiono elektrolitycznie, a dokumentację mikrostruktury kompozytów wykonano na zglądach nietrawionych. Rozciąganie oraz ściskanie przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron 1196. Próbkę do próby rozciągania przedstawiono na rys. 5. Dla każdej z próbek zmniejszono, przez obróbkę mechaniczną, średnicę bazy o 2 mm. Do próby ściskania przygotowano próbki o smukłości $h/d=1$. Próbę rozciągania i próbę ściskania realizowano z prędkością liniową 2 mm na minutę.

The highest effective plastic strain in drawn materials is located at the surface of the sample. The maximum values of effective plastic strain were, above 0.18, 0.47 and 0.84 after drawing on 16, 14, 12.2 mm diameter dies, respectively. Inhomogeneity of strain distribution is growing after following drawing passes, which results from an increasing difference between values of effective plastic strain in the sample axis and near the surface.

4. MATERIAL TESTING

4.1. Investigation methods

Microstructure observations were carried out on a Leica DM4000M light microscope on cross and longitudinal sections of unetched the specimens. Tensile and compression tests were carried out on an Instron 1196 testing machine at a linear velocity of 2 mm per minute. For tensile specimens, Fig. 5, the base diameter was reduced by 2 mm by machining. Compression test was carried out for specimens whose slenderness ratio $h/d=1$.



Rys. 5. Próbkę do badań w próbie rozciągania

Fig. 5. Tensile specimens

Pomiary twardości dokonano na zglądach metalograficznych w losowo wybranych miejscach, stosując obciążenie wgłębnika 98 N.

4.2. Wyniki badań

4.2.1. Mikrostruktura

Mikrostruktura aluminium po wyciskaniu przedstawiona została na rys. 6. Na przekroju poprzecznym, mikrostruktura charakteryzuje się jednorodnym ziarnem. Odwrotnie jest w przypadku mikrostruktury na przekroju wzdłużnym, gdzie jest ona zróżnicowana: występują w niej wydłużone ziarna w kierunku płynięcia materiału o wielkości sięgającej kilkuset μm .

Mikrostrukturę kompozytu Al-SiC przedstawiono na rys. 7 i 8. Cząstki węgla krzemu układają się równomiernie w aluminiowej osnowie. Miejscami widoczne są większe skupiska cząstek, jest to szczególnie widoczne na przekrojach wzdłużnych, gdzie cząstki SiC układają się w formie pasm wzdłuż kierunku płynięcia materiału.

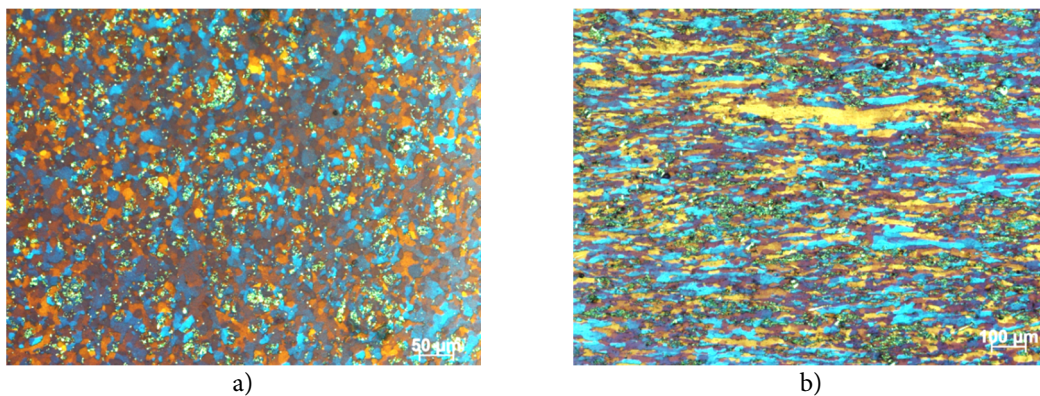
Hardness measurements were carried out on metallographic specimens at randomly selected locations using instrument with load of indenter of 98 N.

4.2. Results

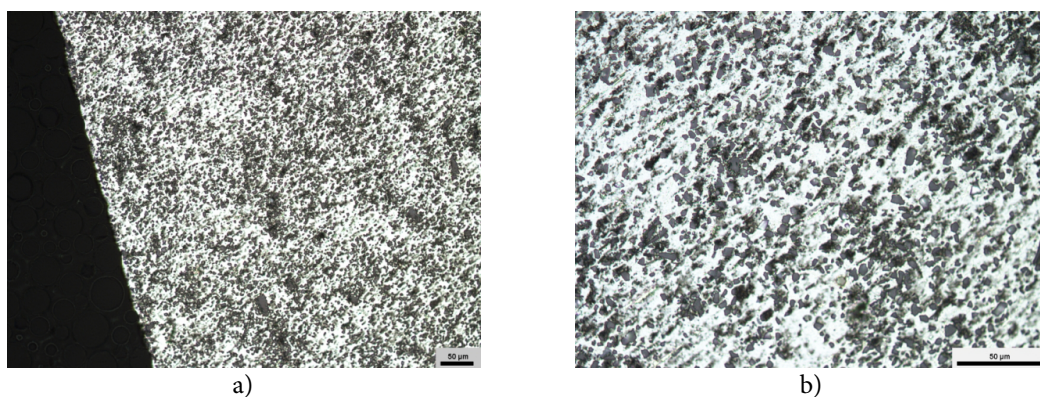
4.2.1. Microstructure

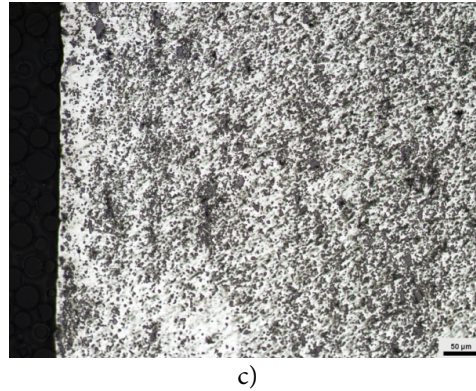
Microstructure of extruded aluminium is shown in Fig. 6. In the cross-section of specimen, the microstructure is characterized by a homogeneous grain size. Conversely in the case of a microstructure on a longitudinal section, which is diversified: grains are elongated in the direction of material flow.

Microstructure of Al-SiC is shown in Fig. 7 and 8. Silicon carbide particles are uniformly distributed in the aluminum matrix. In some places there are larger clusters of particles, this is particularly visible on longitudinal sections, where the SiC particles are arranged in the form of bands along the flow direction of the material during extrusion.



Rys. 6. Mikrostruktura aluminium w stanie po wyciskaniu, obserwowana na przekroju: a) poprzecznym, b) wzdłużnym próbki
 Fig. 6. Aluminium microstructure after extrusion on: a) cross and b) longitudinal section of the specimen

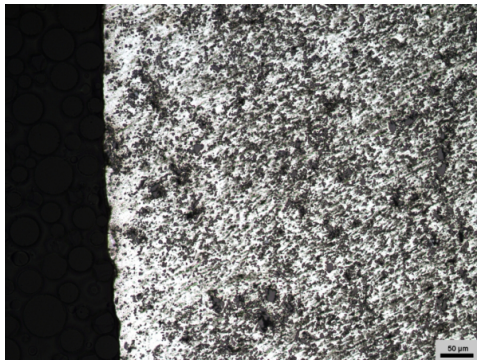




c)

Rys. 7. Mikrostruktura kompozytu Al-5%SiC w stanie po wyciskaniu, obserwowana na przekroju:
a), b) poprzecznym, c) wzdłużnym próbki

Fig. 7. Al-5%SiC microstructure after extrusion on a), b) cross and c) longitudinal section of the specimen



a)



b)



c)

Rys. 8. Mikrostruktura kompozytu Al-10%SiC w stanie po wyciskaniu, obserwowana na przekroju:
a), b) poprzecznym, c) wzdłużnym próbki

Fig. 8. Al-10%SiC microstructure after extrusion on: a), b) cross and c) longitudinal section of the specimen

4.2.2. Własności mechaniczne

Wyniki z próby rozciągania

Zależność naprężenia umownego w funkcji wydłużenia dla próbek po wyciskaniu i ciągnięciu

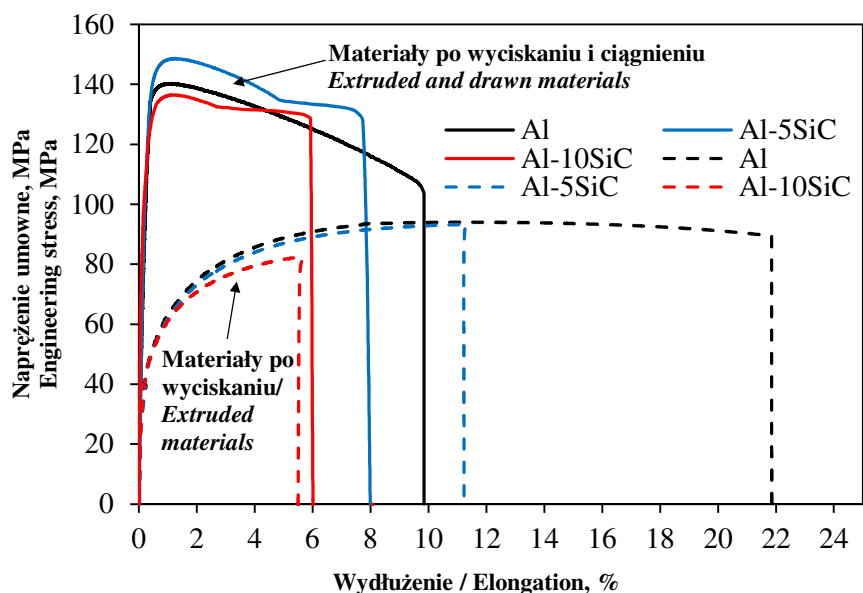
4.2.2. Mechanical properties

Tensile test results

The dependences of engineering stress as a function of elongation for extruded and drawn

na średnicę 12,2 mm przedstawiono na rys. 9. Wytrzymałość na rozciąganie dla wszystkich próbek zestawiono w tab. 2.

to 12.2 mm diameter specimens are shown Fig. 9. Values of tensile strength for all specimens are shown in Tab. 2.



Rys. 9. Zależność naprężenia umownego w funkcji wydłużenia dla materiałów w stanie po wyciskaniu oraz po wyciskaniu i ciągnienu na średnicę 12,2 mm

Fig. 9. Engineering stress vs. elongation of extruded and drawn materials to diameter 12.2 mm

Tab. 2. Wytrzymałość na rozciąganie dla wyciskanych i ciągnionych materiałów Al, Al-SiC
Tab. 2. Tensile strength of extruded and drawn materials Al, Al-SiC

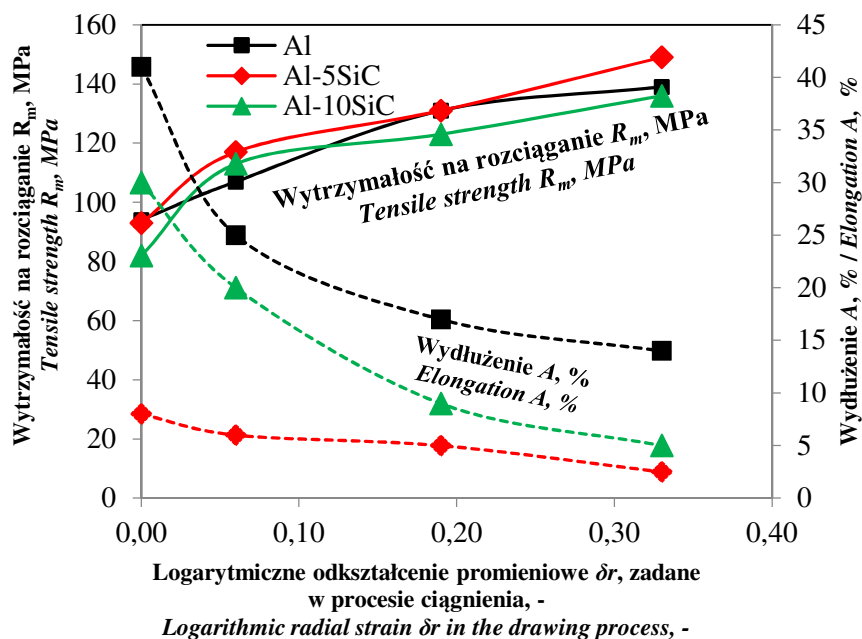
Lp. No.	Materiał Material	Proces Process	Wytrzymałość na rozciąganie R_m , MPa Tensile strength R_m , MPa
1	Al	Wyciskanie Extrusion	94
2	Al-5%SiC		93
3	Al-10%SiC		82
4	Al	Wyciskanie i ciągnienu z użyciem oczka o średnicy 16 mm Extrusion and drawing using drawhole with diameter 16 mm	107
5	Al-5%SiC		117
6	Al-10%SiC		113
7	Al	Wyciskanie i ciągnienu z użyciem oczka o średnicy 16 i 14 mm Extrusion and drawing with using drawhole with diameter 16 mm and 14 mm	131
8	Al-5%SiC		131
9	Al-10%SiC		123
10	Al	Wyciskanie i ciągnienu z użyciem oczka o średnicy 16, 14 i 12,2 mm Extrusion and drawing with using drawhole with diameter 16, 14 and 12.2 mm	139
11	Al-5%SiC		149
12	Al-10%SiC		136

Wytrzymałość na rozciąganie aluminium oraz kompozytów na jego osnowie jest porównywalna i mieści się w zakresie 82–94 MPa. Po zastosowaniu ciągnięcia na zimno wytrzymałość na rozciąganie analizowanych materiałów wzrasta i zależy od wielkości zadanego odkształcenia. Największą wytrzymałością, wynoszącą 139–149 MPa, charakteryzują się badane materiały po ciągnięciu na średnicę 12,2 mm, która jest większa o ok. 50% od wytrzymałości tych samych materiałów, ale w stanie po wyciskaniu.

Zależność wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia w funkcji odkształcenia zadanego podczas ciągnięcia przedstawiono na rys. 10. Kosztem wzrostu wytrzymałości, który został osiągnięty przez zastosowanie ciągnięcia na zimno, jest spadek własności plastycznych. Aluminium i kompozyty Al-SiC wykazują największą wartość wydłużenia w stanie po wyciskaniu, która zmniejsza się po zastosowaniu kolejnych przejść w procesie ciągnięcia.

Tensile strength of aluminum and aluminium matrix composites is comparable and its values are within the range 82–94 MPa. After cold drawing, the tensile strength increases and depends on strain during drawing. The highest strength of 139–149 MPa is characterized by materials after drawing to a diameter of 12.2 mm, which is greater than the strength of the same materials after extrusion by about 50%.

The dependence of tensile strength and elongation as a function of strain during drawing is shown in Fig. 10. At the expense of increase of tensile strength after cold drawing is the loss of ductility. Aluminum and Al-SiC composites exhibit the greatest value of elongation after extrusion, which decreases after applying successive drawing passes.

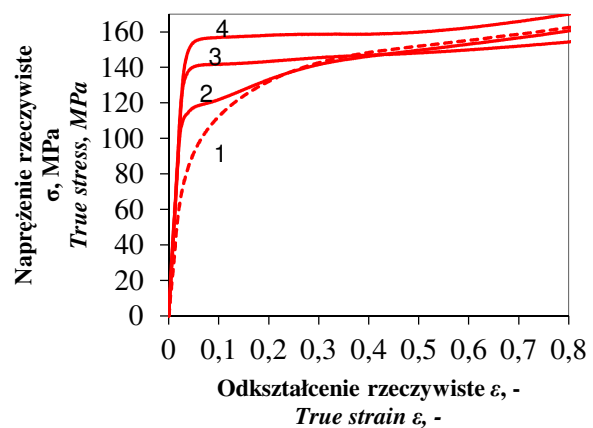
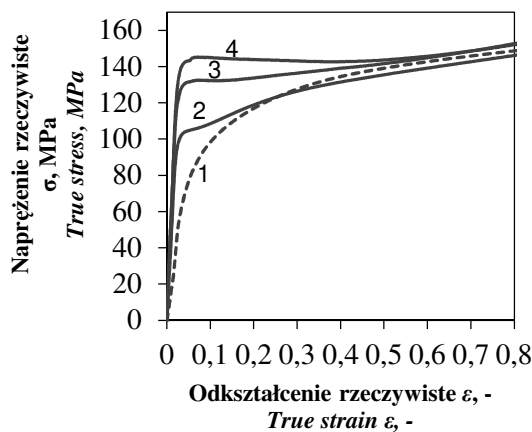


Rys. 10. Wpływ wielkości odkształcenia podczas ciągnięcia na wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie dla aluminium i kompozytów Al-SiC

Fig. 10. Effect of logarithmic radial strain δ_r during drawing on tensile strength and elongation for aluminium and Al-SiC composites

Wyniki z próby ściskania

Opracowane zależności naprężenia rzeczywistego w funkcji odkształcenia dla aluminium i kompozytu o zawartości 5%SiC przedstawiono na rys. 11. Wartości naprężenia odpowiadającego odkształceniu 0,2% badanych materiałów po poszczególnych procesach zestawiono w tab. 3.



Rys. 11. Zależność naprężenia rzeczywistego w funkcji odkształcenia logarytmicznego dla materiałów: a) Al, b) Al-5SiC w stanie po: 1 – wyciskaniu oraz po ciągnięciu ze średnicy 17 mm na średnicę: 2 – 16 mm, 3 – 14 mm i 4 – 12,2 mm

Fig. 11. Stress-strain relationship for: a) Al, b) Al-5SiC materials after: 1 – extrusion and after drawing from 17 mm diameter to diameter: 2 – 16 mm, 3 – 14 mm i 4 – 12.2 mm

Tab. 3. Wartości umownej granicy plastyczności dla wyciskanych i ciągnionych materiałów Al, Al-SiC

Tab 3. Yield strength of extruded and drawn Al and Al-SiC materials

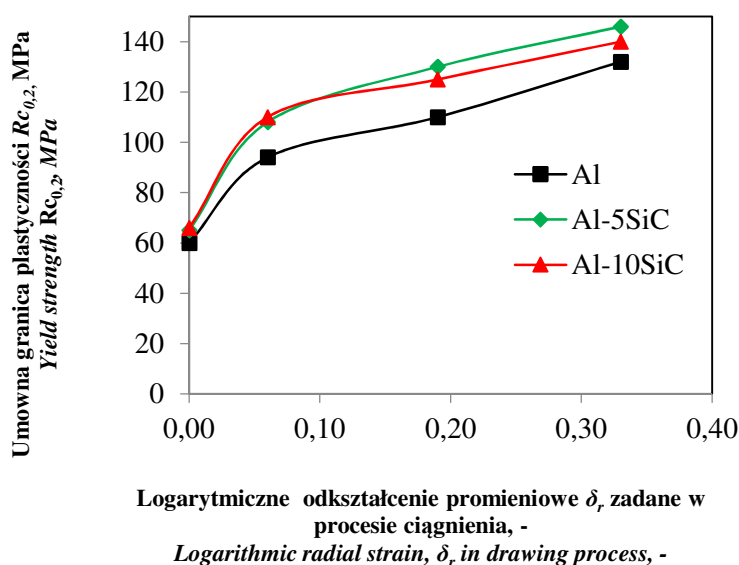
Lp. No.	Materiał Material	Proces Process	Umowna granica plastyczności $R_{c0,2}$, MPa Yield strength $R_{c0,2}$, MPa
1	Al	Wyciskanie Extrusion	60
2	Al-5%SiC		65
3	Al-10%SiC		66
4	Al	Wyciskanie i ciągnięcie z użyciem oczka o średnicy 16 mm Extrusion and drawing with using drawhole with diameter 16 mm	94
5	Al-5%SiC		108
6	Al-10%SiC		110
7	Al	Wyciskanie i ciągnięcie z użyciem oczka o średnicy 16 i 14 mm Extrusion and drawing with using drawhole with diameter 16 mm and 14 mm	110
8	Al-5%SiC		130
9	Al-10%SiC		125
10	Al	Wyciskanie i ciągnięcie z użyciem oczka o średnicy 16, 14 i 12,2 mm Extrusion and drawing with using drawhole with diameter 16, 14 and 12.2 mm	132
11	Al-5%SiC		146
12	Al-10%SiC		140

Odkształcenie na zimno spowodowało znaczny przyrost granicy plastyczności, średnio o 62, 91 i 139%, po ciągnięciu na średnicę odpowiednio 16, 14 i 12,2 mm. Większy przyrost granicy plastyczności wystąpił w przypadku kompozytów Al-SiC. Najwyższą granicą plastyczności z analizowanych materiałów charakteryzuje się kompozyt o zawartości 5% SiC w stanie po ciągnięciu na średnicę 12,2 mm, która w porównaniu do stanu po wyciskaniu wzrosła z 65 do 146 MPa.

Na rys. 12 przedstawiono zależność granicy plastyczności w funkcji wielkości odkształcenia rzeczywistego, jakie zostało zadane w poszczególnych przejściach procesu ciągnięcia. Największy przyrost granicy plastyczności, zarówno dla aluminium, jak i kompozytów Al-SiC, wystąpił już po pierwszym ciągnięciu, w którym logarytmiczne odkształcenie promieniowe wynosiło 0,06.

Cold deformation caused a significant increase of the yield strength, on average 62, 91 and 139% after drawing to diameter 16, 14 and 12.2 mm, respectively. A larger increase in yield strength occurred in the case of Al-SiC composites. The highest yield strength of the materials was for a 5% SiC composite after drawing to a diameter of 12.2 mm, which in comparison to the state after extrusion has increased from 65 to 146 MPa.

Fig. 12 shows the dependence of yield strength on logarithmic radial strain δ_r in the drawing process. The largest increase in yield strength for both aluminium and Al-SiC composites occurred after the first drawing pass, in which the logarithmic radial strain was 0.06.



Rys. 12. Wpływ wielkości logarytmicznego odkształcenia promieniowego zadanego podczas ciągnięcia na wartość umownej granicy plastyczności aluminium i kompozytów Al-SiC

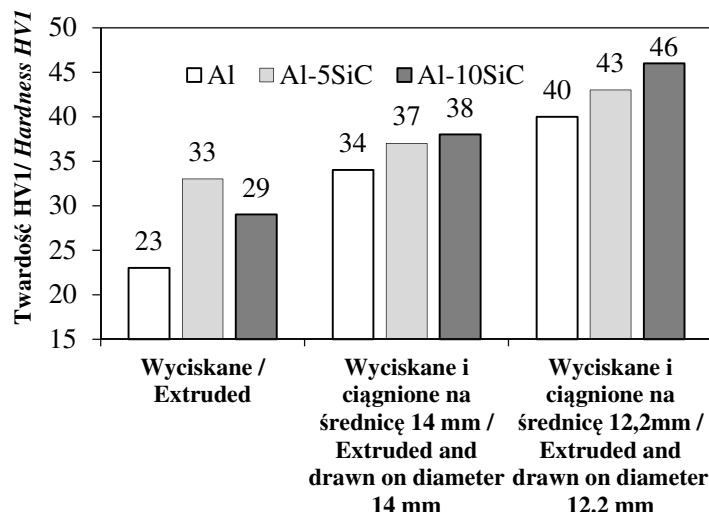
Fig. 12. Influence of logarithmic radial strain during drawing on yield strength of aluminium and Al-SiC composites

Wyniki pomiaru twardości

Pomiary twardości metodą Vickersa przeprowadzono na zglądach metalograficznych w losowo wybranych miejscach. Wartości średnie z tych pomiarów, dla materiałów po wyciskaniu i ciągnięciu z użyciem oczek o średnicy 14 i 12,2 mm, przedstawiono na rys. 13.

Hardness test results

Vickers hardness measurements were carried out on metallographic specimens in randomly selected places. The average values of these measurements for extruded materials and after drawing using dies with a diameter of 14 and 12.2 mm is shown in Fig. 13.



Rys. 13. Twardość aluminium i kompozytów Al-SiC po wyciskaniu oraz po ciągnięciu na średnicę 14 i 12,2 mm

Fig. 13. Hardness of aluminium and Al-SiC specimens after extrusion and drawing to diameter 14 and 12.2 mm

Obserwuje się wzrost twardości materiałów Al i Al-SiC w rezultacie ciągnięcia na zimno, który zależy od wielkości zadanej odkształcenia. Największą twardością po wyciskaniu 29–33 HV charakteryzują się kompozyty Al-SiC, która to po ciągnięciu na średnicę 12,2 mm wzrosła do 43–46 HV1.

An increase of the hardness of Al and Al-SiC materials is observed as a result of the cold drawing, which depends on the value of strain during drawing. The greatest hardness after extrusion 29–33 HV is characterized by Al-SiC composites, which after drawing to a diameter of 12.2 mm increased to 43–46 HV1.

5. WNIOSKI

Wytworzone materiały Al i Al-SiC z proszków poddano z powodzeniem procesowi ciągnięcia na zimno. Badania dowodzą, że możliwe jest podwyższenie własności wytrzymałościowych kompozytów Al-SiC tą metodą. Otrzymane wyniki pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- własności wytrzymałościowe aluminium i kompozytów, tj. wytrzymałość na rozciąganie i granica plastyczności, rosną ze wzrostem wielkości odkształcenia zadanej podczas ciągnięcia na zimno; największy ich przyrost obserwowany jest już po pierwszym przejściu na średnicę 16 mm, odpowiadającemu logarytmicznemu odkształceniu promieniowemu $\delta r = -0,06$;
- wprowadzenie cząstek SiC do aluminium nie wpłynęło znacząco na wytrzymałość na roz-

5. CONCLUSIONS

The process of cold drawing Al and Al-SiC composites produced by powder metallurgy was successfully carried out. The research carried out on these materials shows that it is possible by this method to increase the strength of Al-SiC composites. The results allow us to formulate the following conclusions:

- mechanical properties of aluminum and composites such as tensile strength, yield strength, increase with the increase value of strain during drawing. The largest increase of these properties was observed after the first drawing pass to the diameter 16 mm, corresponding to logarithmic radial strain $\delta r = -0.06$;
- addition of SiC particles does not have a major impact on the tensile strength of these materials,

ciąganie badanych materiałów, ale w znaczący sposób podniosło ich granicę plastyczności, która osiągnęła najwyższą wartość dla kompozytu Al-5%SiC po ostatnim przejściu w procesie ciągnięcia;

- kosztem wzrostu własności wytrzymałościowych po kolejnych przejściach w procesie ciągnięcia następuje obniżenie własności plastycznych; własności plastyczne spadają również ze wzrostem udziału cząstek w aluminiowej osnowie;
- wprowadzenie cząstek SiC do aluminiowej osnowy spowodowało niewielki wzrost twardości; po odkształceniu przez ciągnięcie na zimno występuje dalszy wzrost twardości kompozytów, zależny od wielkości zadanego odkształcenia.

but significantly increased their yield strength, which reached the highest value for the Al-5% SiC composite after the last pass in the drawing process to 12.2 mm diameter;

- *at the expense of the increase of strength after subsequent drawing passes, ductility was reduced; ductility also decreases with the increase of the content of particles in the aluminum matrix;*
- *addition of SiC particles to aluminium matrix caused a slight increase in its hardness; after deformation of the composites, there is a further increase in hardness which is dependent on the value of strain during drawing.*

PODZIĘKOWANIA

Badania zostały zrealizowane w ramach badań statutowych na AGH pt. „Kompozyty warstwowe i umocnione cząstkami nie reagującymi z osnową” w roku 2017. Numer pracy: 11.11.110.292.

LITERATURA

- [1] Kaczmar J.W., K. Pietrzak, W. Włosiński. 2000. “The production and application of metal matrix composite materials”. *Journal of Materials Processing Technology* 106: 58–67.
- [2] Szczepanik S., M. Wojtaszek, P. Nikiel. 2011. „Tworzywa z proszku aluminium i kompozytu Al-cząstki SiC, formowane w procesie kucia matrycowego”. *Rudy i Metale Nieżelazne* 56 (7–8): 390–396.
- [3] Szczepanik S., M. Wojtaszek, P. Nikiel, J. Krawiarz. 2012. „Wybrane własności kompozytów na osnowie proszku aluminium, umocnionych cząstkami SiC, otrzymanych przez wyciskanie na gorąco”. *Rudy i Metale Nieżelazne* 57 (12): 857–863.
- [4] Woźniak J., M. Kostecki, W. Bochniak, A. Olszyna. 2010. “Al/SiC composites produced by direct extrusion using the KOBO method”. *Inżynieria Materiałowa* 31 (3): 453–456.
- [5] El-Sabbagha A., M. Soliman, M. Taha, H. Palkowski. 2012. “Hot rolling behaviour of stir-cast Al 6061 and Al 6082 alloys – SiC fine particulates reinforced composites”. *Journal of Materials Processing Technology* 212 (2): 497–508.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was carried out as part of statutory research at AGH “Layered composites and composites reinforced with particles not reacting with the matrix” in 2017 year. Work no.: 11.11.110.292.

REFERENCES

- [1] Kaczmar J.W., K. Pietrzak, W. Włosiński. 2000. “The production and application of metal matrix composite materials”. *Journal of Materials Processing Technology* 106: 58–67.
- [2] Szczepanik S., M. Wojtaszek, P. Nikiel. 2011. „Tworzywa z proszku aluminium i kompozytu Al-cząstki SiC, formowane w procesie kucia matrycowego”. *Rudy i Metale Nieżelazne* 56 (7–8): 390–396.
- [3] Szczepanik S., M. Wojtaszek, P. Nikiel, J. Krawiarz. 2012. „Wybrane własności kompozytów na osnowie proszku aluminium, umocnionych cząstkami SiC, otrzymanych przez wyciskanie na gorąco”. *Rudy i Metale Nieżelazne* 57 (12): 857–863.
- [4] Woźniak J., M. Kostecki, W. Bochniak, A. Olszyna. 2010. “Al/SiC composites produced by direct extrusion using the KOBO method”. *Inżynieria Materiałowa* 31 (3): 453–456.
- [5] El-Sabbagha A., M. Soliman, M. Taha, H. Palkowski. 2012. “Hot rolling behaviour of stir-cast Al 6061 and Al 6082 alloys – SiC fine particulates reinforced composites”. *Journal of Materials Processing Technology* 212 (2): 497–508.

- [6] Shirvanimoghaddam K., H. Khayyam, H. Abdizadeh, M. Akbari Karbalaeei, A.H. Pakseresht, F. Abdi, A. Abbasi, M. Naebe. 2016. "Effect of B₄C, TiB₂ and ZrSiO₄ ceramic particles on mechanical properties of aluminium matrix composites: Experimental investigation and predictive modelling". *Ceramics International* 42: 6206–6220.
- [7] Shorowordi K.M., T. Laoui, A.S.M.A. Haseeb, J.P. Celis, L. Froyen. 2003. "Microstructure and interface characteristics of B₄C, SiC and Al₂O₃ reinforced Al matrix composites: a comparative study". *Journal of Materials Processing Technology* 142: 738–743.
- [8] Sun Ch., M. Song, Z. Wang, Y. He. 2011. "Effect of Particle Size on the Microstructures and Mechanical Properties of SiC-Reinforced Pure Aluminum Composites." *Journal of Materials Engineering and Performance* 20 (9): 1606–1612.
- [9] Cöcen Ü., Ö. Kazim. 2002. "Ductility and strength of extruded SiCp/aluminium-alloy composites." *Composites Science and Technology* 62: 275–282.
- [10] Song M. 2009. "Effects of volume fraction of SiC particles on mechanical properties of SiC/Al composites". *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 19: 1400–1404.
- [11] Ramu G., R. Bauri. 2009. "Effect of equal channel angular pressing (ECAP) on microstructure and properties of Al–SiCp composites". *Materials and Design* 30: 3554–3559.
- [12] Arab M.S., N. El Mahallawy, F. Shehata, M.A. Agwa. 2014. "Refining SiCp in reinforced Al–SiC composites using equal-channelangular pressing". *Materials and Design* 64: 280–286.
- [13] Amirkhanlou S., M.R. Rezaei, B. Niroumand, M.R. Toroghinejad. 2011. "Refinement of microstructure and improvement of mechanical properties of Al/Al₂O₃ cast composite by accumulative roll bonding process". *Materials Science and Engineering A* 528: 2548–2553.
- [6] Shirvanimoghaddam K., H. Khayyam, H. Abdizadeh, M. Akbari Karbalaeei, A.H. Pakseresht, F. Abdi, A. Abbasi, M. Naebe. 2016. "Effect of B₄C, TiB₂ and ZrSiO₄ ceramic particles on mechanical properties of aluminium matrix composites: Experimental investigation and predictive modelling". *Ceramics International* 42: 6206–6220.
- [7] Shorowordi K.M., T. Laoui, A.S.M.A. Haseeb, J.P. Celis, L. Froyen. 2003. "Microstructure and interface characteristics of B₄C, SiC and Al₂O₃ reinforced Al matrix composites: a comparative study". *Journal of Materials Processing Technology* 142: 738–743.
- [8] Sun Ch., M. Song, Z. Wang, Y. He. 2011. "Effect of Particle Size on the Microstructures and Mechanical Properties of SiC-Reinforced Pure Aluminum Composites." *Journal of Materials Engineering and Performance* 20 (9): 1606–1612.
- [9] Cöcen Ü., Ö. Kazim. 2002. "Ductility and strength of extruded SiCp/aluminium-alloy composites." *Composites Science and Technology* 62: 275–282.
- [10] Song M. 2009. "Effects of volume fraction of SiC particles on mechanical properties of SiC/Al composites". *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 19: 1400–1404.
- [11] Ramu G., R. Bauri. 2009. "Effect of equal channel angular pressing (ECAP) on microstructure and properties of Al–SiCp composites". *Materials and Design* 30: 3554–3559.
- [12] Arab M.S., N. El Mahallawy, F. Shehata, M.A. Agwa. 2014. "Refining SiCp in reinforced Al–SiC composites using equal-channelangular pressing". *Materials and Design* 64: 280–286.
- [13] Amirkhanlou S., M.R. Rezaei, B. Niroumand, M.R. Toroghinejad. 2011. "Refinement of microstructure and improvement of mechanical properties of Al/Al₂O₃ cast composite by accumulative roll bonding process". *Materials Science and Engineering A* 528: 2548–2553.