

Marek Wojtaszek¹, Stefan Szczepanik²

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Metalurgii i Inżynierii Materiałowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

WYBRANE WŁASNOŚCI KOMPOZYTU ALUMINIUM-CZĄSTKI WĘGLIKA KRZEMU OTRZYMANEGO PRZEZ WYCISKANIE WYPRASEK Z PROSZKU

Kompozyty na osnovach metalicznych wytwarzane są metodami odlewniczymi lub metodami metalurgii proszków. W pracy przedstawiono wyniki badań materiałów otrzymanych przez wyciskanie w temperaturze 500°C wyprasek z proszku aluminium RAL-1 oraz kompozytów na osnowie tego proszku zawierających 2 lub 5% objętościowo węgla krzemu. Badano wpływ składu chemicznego i współczynnika wyciskania na zagęszczenie, strukturę i wybrane własności otrzymanych półwyrobów. Otrzymano materiał o wysokich gęstościach względnych (rys. 2a). Wprowadzony węgiel krzemu obniża gęstość względną wyrobów. Kompozyt o zawartości 5% objętościowych węgla krzemu ma większą o 17,3 MPa wytrzymałość na rozciąganie, w porównaniu do materiału osnowy otrzymanego z takim samym współczynnikiem wyciskania $\lambda = 13,32$. Badania metalograficzne (rys. 6) wykazały korzystne rozłożenie cząstek węgla krzemu w osnowie. Wprowadzenie cząstek umacniających w ilości 2% objętościowych spowodowało prawie dwukrotne zmniejszenie zużycia ściernego, wyrażonego poprzez ubytek objętości. Większy udział cząstek nie powoduje znaczącej poprawy tej własności.

Słowa kluczowe: proszek aluminium, cząstki SiC, kompozyt, wyciskanie

CHOSEN PROPERTIES OF ALUMINIUM-SILICON CARBIDE PARTICLES COMPOSITE OBTAINED BY EXTRUSION OF POWDER COMPACTS

Metal-based composites are mainly produced by casting or by powder metallurgy route. In this work the results of the research on manufacturing the materials obtained by extrusion of water atomized RAL-1 aluminium powder compacts at 500°C and composites based on this powder, containing 2 and 5 vol.% silicon carbide are presented. Influence of chemical composition and reduction ratio during extrusion on density, structure changes and chosen mechanical properties was investigated. As the result, highly densified material was produced (Fig. 2a). It was found that strengthening phase (SiC) lowered the density of composite materials. Their mechanical properties depend on amount of silicon carbide particles. Composite material containing 5 vol.% silicon carbide, formed with extrusion ratio of 13.32, exhibited better mechanical properties than matrix material (aluminium). By introducing 2 vol.% silicon carbide particles into aluminium matrix it was possible to almost double decrease of volume loss of the material during wear resistance tests. Greater amount of strengthening phase did not cause this phenomenon.

Key words: aluminium powder, SiC particles, composite, extrusion

WPROWADZENIE

Technologia otrzymywania materiałów kompozytowych na osnovach metalicznych oparta na zastosowaniu metalurgii proszków umożliwia przygotowanie w stosunkowo prosty sposób mieszanin oraz zastosowanie niższych temperatur niż podczas ich otrzymywania metodami odlewniczymi. Daje to możliwość wytwarzania kompozytów ze składników o wzajemnej reaktywności. Ważnym czynnikiem, mającym wpływ na osiągnięcie optymalnych własności mechanicznych, jest możliwość uzyskiwania drobnoziarnistej mikrostruktury osnowy. W ten sposób można wytwarzać materiały umacniane cząstkami dyspersyjnymi, cząstkami płytkowymi, włóknami nieciągłymi (krótkimi) lub włóknami ciągłymi [1]. Nadanie własności wyrobom otrzymywanym z proszków w konwencjonalnych procesach odby-

wa się głównie poprzez użycie mieszanek metali, proszków stopowych, wprowadzenie metalicznej lub niemetalicznej fazy wzmacniającej (cząstki, włókna) oraz zastosowanie procesów przeróbki plastycznej.

Spośród materiałów kompozytowych na osnovach metalicznych istotne znaczenie mają kompozyty umocnione cząstkami. W przypadku tego typu tworzyw obciążenia przenoszone są przez osnowę oraz cząstki. Działanie umacniające ma charakter złożony i realizuje się zarówno przez sprężyste oddziaływanie cząstek z osnową, jak i przez hamowanie odkształceń plastycznych w osnowie [2]. Efekt umocnienia zależy od wielkości cząstek, odległości między nimi i równomierności ich rozproszczenia w osnowie, oddziaływań sprężystych między osnową a cząstkami, zachowania samych czą-

¹ dr inż., ² dr hab. inż.

stek w zakresie odkształcenia sprężystego i plastycznego oraz technologii otrzymywania kompozytu. Z powodu tej złożoności stopień umocnienia kompozytu jest trudny do oszacowania.

Jedną z metod wprowadzania cząstek fazy umacniającej do osnowy kompozytu jest mechaniczne mieszanie. W ten sposób otrzymuje się kompozyty w skali przemysłowej oraz dla celów badawczych. Przy wytwarzaniu kompozytów z zastosowaniem procesu spiekania mieszanki musi być uprzednio sprasowana na zimno. W procesie kształtowania na gorąco mogą być stosowane zarówno wypraski, jak i mieszaniny proszków [3].

Na podstawie przeprowadzonych badań w [4, 5] stwierdzono, że warunkiem niezbędnym do uzyskania drogą metalurgii proszków kompozytu o wymaganych dla materiałów konstrukcyjnych wysokich własnościach jest otrzymanie jego porowatości poniżej 5%, co można osiągnąć w procesach kształtowania plastycznego na gorąco. Procesy te, przy stosunkowo niewielkich modyfikacjach, mogą być przeprowadzone z użyciem konwencjonalnych operacji z zakresu przeróbki plastycznej. Ich realizacja przy właściwie dobranych parametrach umożliwi uzyskanie produktu o dużej gęstości względnej, określonym stopniu przerobu, korzystnej strukturze oraz wymaganych własnościach. W pracy [6] przedstawiono wyniki badań otrzymywania kompozytu na osnowie aluminium umocnionego cząstkami węgla krzemowego w ilości 5%. Materiał ten otrzymywano z proszków przez zagęszczanie na gorąco, uzyskując tworzywo konstrukcyjne o dobrych własnościach mechanicznych.

Kompozyty metal-cząstki wzbudzają coraz szersze zainteresowanie nie tylko ze względu na dobre własności mechaniczne, ale również z powodu podwyższonej odporności na zużycie ścierne. Cecha ta stanowi jedno z podstawowych kryteriów oceny przy decyzji o zastosowaniu danego materiału do wytwarzania współpracujących elementów. W wielu ośrodkach badawczych na świecie prowadzone są prace, których celem jest określenie odporności na zużycie ścierne tego typu materiałów. Rezultaty tych badań są często kontrowersyjne [7, 8], ponieważ o ich wyniku decyduje wiele czynników, między innymi materiał osnowy i fazy umacniającej, obecność dodatków oraz przyjęta metoda wytwarzania kompozytu. Istotny wpływ na wyniki badań mają także warunki przeprowadzenia próby zużycia ściernego, jak nacisk, prędkość ścierania, rodzaj tarcia, wymiary próbek, wielkość powierzchni styku oraz inne. Bardzo istotnym problemem jest również wpływ typu, kształtu i twardości „przeciwróbkki”, którą jest np. papier ścierny, tarcza ścierna lub inna powierzchnia [9].

Spośród kompozytów typu metal-cząstki interesujące jest tworzywo na osnowie aluminium wzmocnione cząstkami węgla krzemowego. Materiał tego typu otrzymać można z proszków, w procesach kucia matrycowego lub wyciskania [10]. Spodziewane korzyści użytkowe wynikające z zastosowania tego tworzywa to przede wszystkim

zmniejszona masa wyrobów oraz wyższa odporność na zużycie ścierne.

BADANIA WŁASNE

Cel i zakres badań

Celem badań było określenie wpływu składu chemicznego i współczynnika wyciskania na gęstość, strukturę i wybrane własności mechaniczne i użytkowe półwyrobów otrzymanych w procesie wyciskania w temperaturze 500°C wyprasek proszku aluminium RAI-1 oraz sprasowanych mieszanin tego proszku i cząstek węgla krzemowego.

Jako materiał osnowy zastosowano rozpylany proszek aluminium RAI-1 o składzie chemicznym zestawionym w tabeli 1.

TABELA 1. Skład chemiczny proszku aluminium RAI-1
TABLE 1. Chemical composition of RAI-1 aluminium powder

Fe, %	Si, %	Cu, %	Zn, %	Ti, %	Al, %
0,2	0,3	0,02	0,06	0,03	reszta

Proszek aluminium-węgiel krzemowy, w ilości odpowiednio 2 i 5% objętościowych, mieszano na sucho w ciągu 60 minut. Odważki mieszanin oraz proszku aluminium, o masie zależnej od przyjętego współczynnika wyciskania, prasowano w temperaturze otoczenia do uzyskania gęstości względnej wynoszącej 80%. Średnica wyprasek wynosiła 35 mm. Wypraski wyciskano na stanowisku badawczym w Zakładzie Plastycznej Przeróbki Metali Wydziału Metalurgii i Inżynierii Materiałowej AGH, w gnieździe prasy hydraulicznej ZD-100. Wyciskanie prowadzono przy temperaturze wsadu i narzędzi 500°C, z prędkością stempla 0,1 mm/s. Współczynnik wyciskania λ wynosił odpowiednio 4,11 oraz 13,32. Podczas procesu wyciskania mierzono siłę niezbędną do jego przeprowadzenia w funkcji przemieszczenia stempla.

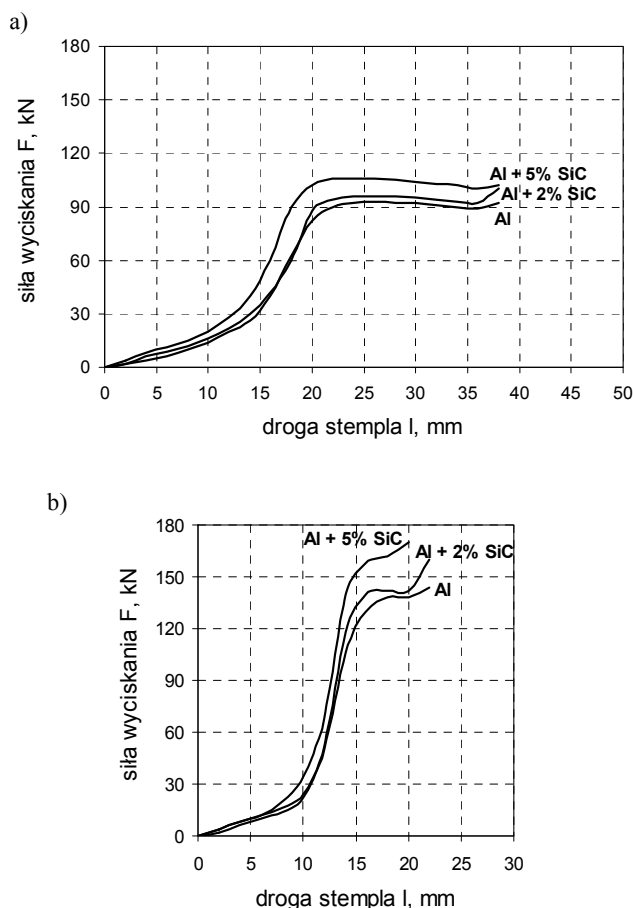
Dla wyciskanych półwyrobów z aluminium i kompozytów określono gęstości oraz w próbie jednoosiowego rozciągania wyznaczono wytrzymałość na rozciąganie i przewężenie. Przeprowadzono również badania zużycia ściernego tych materiałów. Ocenie poddano także struktury materiałów.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Siły wyciskania

Podczas procesu wyciskania przeprowadzono pomiary sił potrzebnych do jego realizacji. Zmiany siły wyciskania w zależności od drogi stempla, współczynnika wyciskania oraz składu chemicznego wsadu zestawiono na rysunku 1. Z zestawień przebiegów zmian sił w za-

leżności od zastosowanych parametrów wyciskania wynika, że zwiększenie współczynnika wyciskania λ z 4,11 do 13,32 powoduje wzrost siły niezbędnej do prowadzenia procesu. Podwyższenie siły następuje również w wyniku wprowadzenia do aluminium węgla krzemu oraz zwiększenia jego udziału objętościowego we wsadzie.

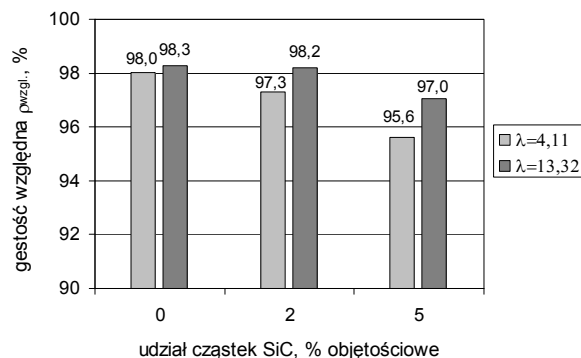


Rys. 1. Przykładowe przebiegi zmian siły w zależności od drogi stempla podczas wyciskania w temperaturze 500°C wyprasek proszku aluminium RAl-1 oraz sprasowanych mieszanin tego proszku i cząstek węgla krzemu. Współczynnik wyciskania λ : a) 4,11, b) 13,32

Fig. 1. Examples of extrusion force-ram displacement relationship of extruded at 500°C RAl-1 aluminium powder compacts and aluminium powder-SiC particles composite materials. Extrusion ratio λ : a) 4.11, b) 13.32

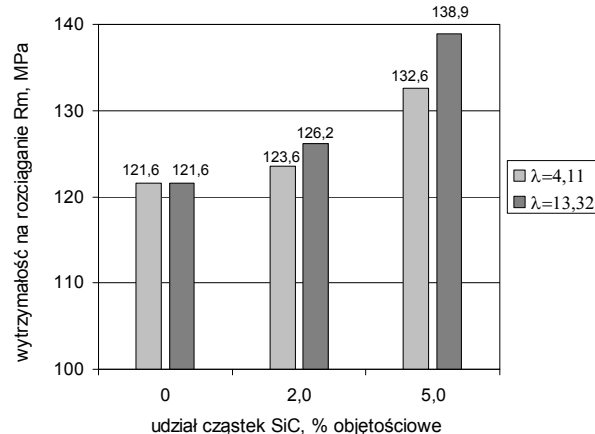
Gęstość wyciskanych półwyrobów

Gęstości wyciskanych materiałów określono metodą ważenia w wodzie i na powietrzu. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki badań wpływu składu chemicznego i współczynnika wyciskania na względną gęstość i porowatość półwyrobów. Wprowadzenie węgla krzemu do aluminium powoduje nieznaczny spadek zagęszczenia kompozytów. Materiały kształtowane przy większej wartości współczynnika wyciskania mają wyższą gęstość względną.



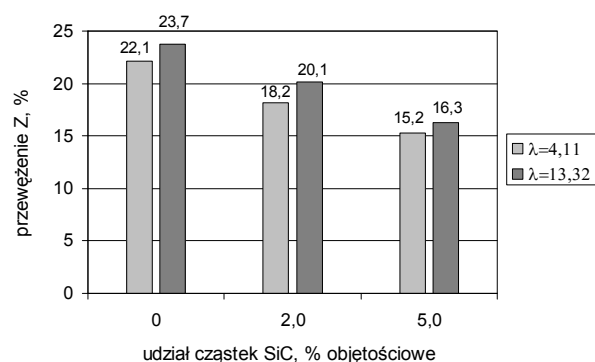
Rys. 2. Wpływ składu chemicznego i współczynnika wyciskania λ na gęstość względną wyciskanych w temperaturze 500°C półwyrobów z proszku RAl-1 i kompozytów na jego osnowie wzmocnionych cząstkami węgla krzemu

Fig. 2. Influence of chemical composition and extrusion ratio on relative density of extruded aluminium at 500°C powder semi-products and aluminium powder-silicon carbide particles composites



Rys. 3. Wpływ składu chemicznego i współczynnika λ na wytrzymałość na rozciąganie R_m wyciskanych w temperaturze 500°C półwyrobów z proszku RAl-1 i kompozytów na jego osnowie wzmocnionych cząstkami węgla krzemu

Fig. 3. Influence of chemical composition and extrusion ratio on tensile strength (TS) of extruded at 500°C aluminium powder semi-products and aluminium powder-silicon carbide particles composites



Rys. 4. Wpływ składu chemicznego i współczynnika λ na wartość przewężenia Z_r wyciskanych w temperaturze 500°C półwyrobów z proszku RAl-1 i kompozytów na jego osnowie wzmocnionych cząstkami węgla krzemu

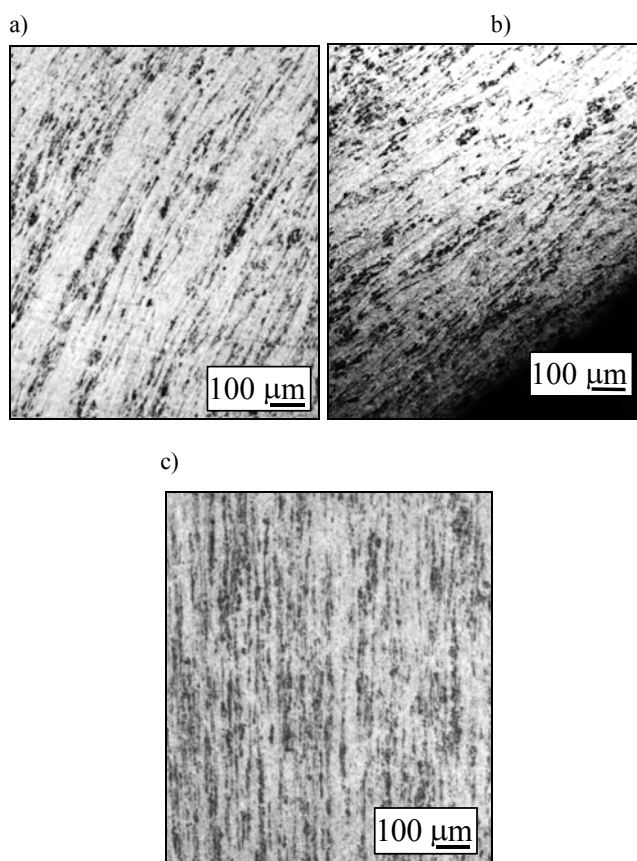
Fig. 4. Influence of chemical composition and extrusion ratio on reduction of area (RA) of extruded at 500°C aluminium powder semi-products and aluminium powder-silicon carbide particles composites

Własności mechaniczne wyciskanych półwyrobów

Własności mechaniczne wyciskanych półwyrobów określono w próbie rozciągania, prowadzonej w temperaturze otoczenia na maszynie wytrzymałościowej Instron 4502. Badano wytrzymałość na rozciąganie i przewężenie wyciskanych półwyrobów. Wyniki badań przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Wytrzymałość na rozciąganie R_m rosła w wyniku wprowadzenia cząstek węgla krzemu do aluminium oraz zwiększenia jego udziału objętościowego w osnowie kompozytu. Wprowadzenie lub zwiększenie zawartości węgla krzemu powodowało obniżenie reprezentowanej przez wartość przewężenia Z plastyczności materiału.

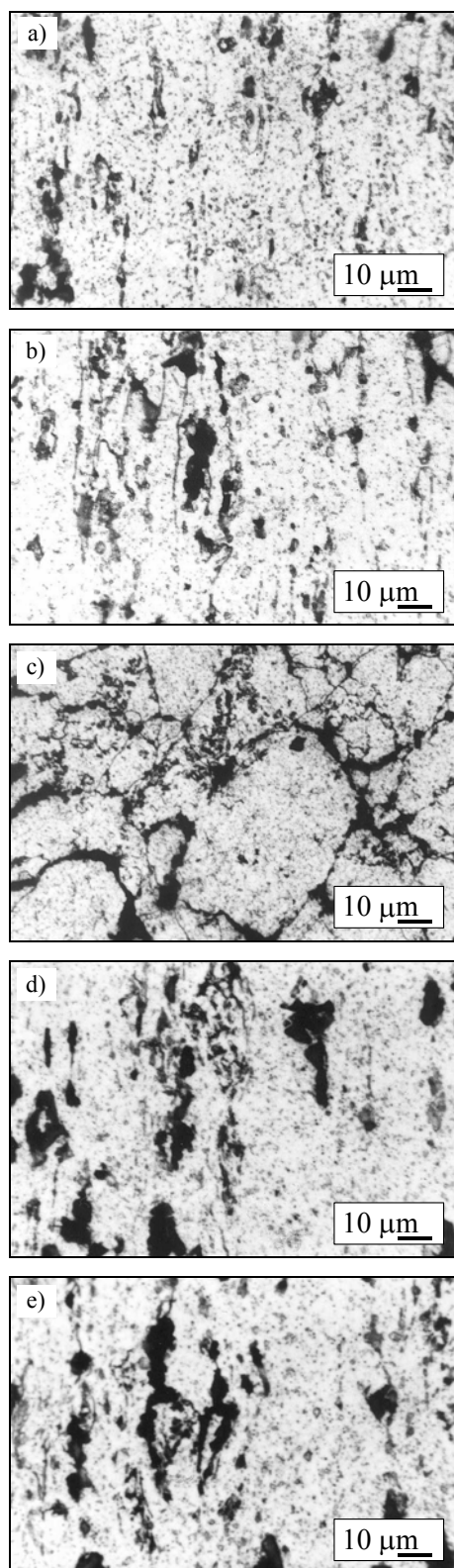
Badania metalograficzne

Badania metalograficzne prowadzono na mikroskopie świetlnym NU. Objęły one obserwację struktur materiałów otrzymanych w procesie wyciskania wyprasek w temperaturze 500°C. Rysunki 5 i 6 przedstawiają odpowiednio struktury półwyrobów z proszku aluminium RA1-1 oraz kompozytów na osnowie tego proszku, umocnionych cząstkami węgla krzemu.



Rys. 5. Struktury materiałów otrzymanych w procesie wyciskania w temperaturze 500°C półwyrobów z rozpylanego proszku RA1-1. Współczynnik wyciskania 13,32: a, b) część niewyciśnięta, c) część wyciśnięta. Zgłady trawione

Fig. 5. Structures of extruded at 500°C aluminum powder semi-products. Extrusion ratio $\lambda = 13.32$; a, b) not extruded area; c) extruded area. Etched specimen



Rys. 6. Struktury otrzymanych w procesie wyciskania w temperaturze 500°C kompozytów na osnowie aluminium, umocnionych cząstkami węgla krzemu: a, b) 2% obj. SiC, c, d, e) 5% obj. SiC. Współczynnik wyciskania: a, b, c, d) $\lambda = 13,32$, e) $\lambda = 4,11$; a, d, e) krawędź próbki, b) oś próbki, c) część niewyciśnięta. Zgłady trawione

Fig. 6. Structures of extruded at 500°C aluminum powder-silicon carbide particles composites. a, b) 2 vol.% SiC, c, d, e) 5 vol.% SiC. Extrusion ratio R: a, b, c, d) 13.32; e) 4.11. a, d, e) sample edge; b) sample axis; c) not extruded area. Etched specimen

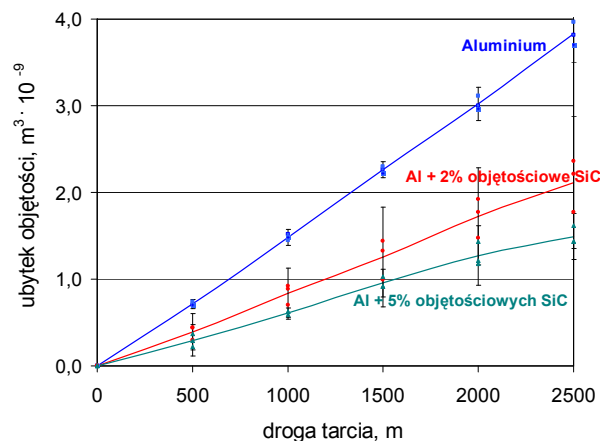
Otrzymane w wyniku wyciskania na gorąco półwyroby z proszku RAl-1 mają strukturę drobnoziarnistą, w której nie zaobserwowano pierwotnych cząstek proszku. W trakcie wyciskania nastąpiło wydłużenie ziaren w kierunku płynięcia materiału. Na zgładach widoczne są rozdrobnione w trakcie kształtowania półwyrobów tlenki, które występowały na powierzchni cząstek proszku aluminium.

Wprowadzone do osnowy cząstki węgla krzemu rozłożone są dość regularnie, obserwuje się również ich skupiska. Nie stwierdzono istotnych różnic w strukturach w obszarze osi próbek i przy ich powierzchni (rys. 6a, b). W części nieodkształconej kompozytu, w obszarze gdzie w procesie wyciskania nastąpiło jedynie zagęszczenie materiału bez jego płynięcia, widoczne są pierwotne granice cząstek proszku osnowy (rys. 6c). Wzdłuż ich granic występują skupiska cząstek węgla krzemu. Nie zaobserwowano istotnego wpływu współczynnika wyciskania λ na rozlokowanie cząstek węgla krzemu w osnowie kompozytu (rys. 6d, e).

Badania na zużycie ścierne wyciskanych materiałów

Badania porównawcze zużycia ściernego przeprowadzono na materiałach wyciskanych ze współczynnikiem $\lambda = 4,11$. Materiał do badań pobrano w części wyciśniętej, w odległości 10 mm od strefy odkształcenia. Wykonano próbki o średnicy 15 mm i wysokości 6 mm. Powierzchnie do badań przygotowano przez ich przeszlifowanie. Pomiar wykonano przy użyciu urządzenia zaprojektowanego na Wydziale Metalurgii i Inżynierii Materiałowej AGH. Jako przeciwpróbkę zastosowano tarczę wykonaną ze stali szybko tnącej o twardości 68 HRC, średnicy 125 mm i grubości 4 mm. Obciążenie próbki wynosiło 20 N. Pomiar prowadzono na drodze tarcia 2500 m przy prędkości obrotowej tarczy $\omega = 0,75$ obr/s, co odpowiadało prędkości liniowej przemieszczenia na powierzchni styku około 0,3 m/s. Po drodze ścierania 500 m próbka była czyszczona ultradźwiękowo w izopropanolu, a następnie ważona na wadze analitycznej z dokładnością 10^{-4} g, w celu określenia ubytku masy. Jako miarę zużycia przyjęto ubytek objętości próbek, który wyznaczono w oparciu o ubytek masy. Uzyskane zależności zestawiono na rysunku 7. Określono wpływ składu chemicznego na zużycie ścierne.

Wprowadzenie do aluminiowej osnowy cząstek węgla krzemu lub zwiększenie ich udziału w kompozycie z 2 do 5% objętościowych powoduje podwyższenie odporności na zużycie ścierne. Badania przeprowadzone na drodze 2500 m wykazały prawie dwukrotnie mniejszy, w porównaniu z materiałem nieumocnionym, średni ubytek objętości dla kompozytu o zawartości 2% cząstek węgla krzemu i prawie trzykrotnie mniejszy dla kompozytu o zawartości 5% cząstek.



Rys. 7. Wpływ składu chemicznego na zużycie ścierne wyciskanych w temperaturze 500°C półwyrobów z proszku RAl-1 i kompozytów na jego osnowie umocnionych cząstkami węgla krzemu. Współczynnik wyciskania $\lambda = 4,11$

Fig. 7. Influence of chemical composition on wear resistance of extruded aluminium powder semi-products and aluminium powder-silicon carbide particles composites. Extrusion ratio $\lambda = 4.11$

WNIOSKI

Na podstawie wyników badań materiałów otrzymanych w procesie wyciskania w temperaturze 500°C wyprasek z rozpylanego proszku aluminium oraz sprasowanych mieszanin tego proszku i cząstek węgla krzemu stwierdzono, że:

1. W procesie wyciskania w temperaturze 500°C możliwe jest uzyskanie półwyrobów z proszku aluminium i kompozytów na jego osnowie umocnionych cząstkami węgla krzemu o gęstościach zbliżonych do gęstości materiałów litych. Materiały kształtowane z większym współczynnikiem wyciskania mają większą gęstość, która nieznacznie spada ze wzrostem zawartości cząstek węgla krzemu w osnowie kompozytu.
2. Siła wyciskania zależy od składu chemicznego półwyrobów i od współczynnika wyciskania. Zwiększenie współczynnika wyciskania, wprowadzenie cząstek węgla krzemu lub podwyższenie ich udziału objętościowego w osnowie kompozytu powoduje wzrost siły wyciskania.
3. Ilościowa i jakościowa poprawa własności następuje poprzez wprowadzenie do osnowy cząstek węgla krzemu i poprzez zwiększenie współczynnika wyciskania. Najwyższą wytrzymałość na rozciąganie uzyskano dla kompozytu o zawartości 5% objętościowych cząstek węgla krzemu, wyciskanego ze współczynnikiem $\lambda = 13,32$.
4. Otrzymane wyroby z proszku RAl-1 mają strukturę drobnoziarnistą, w której nie zaobserwowano pierwotnych cząstek proszku i porów. Wprowadzone do struktury cząstki węgla krzemu rozłożone są w os-

nowie dość regularnie, pojedynczo i w skupiskach.

Nie stwierdzono istotnych jakościowych różnic struktur w obszarze osi próbek i przy ich powierzchni.

5. Wprowadzenie do osnowy lub zwiększenie w niej zawartości cząstek węgla krzemu powoduje zmniejszenie zużycia ściernego wyciskanych półwyrobów. Zwiększenie zawartości cząstek węgla krzemu z 2 do 5% w osnowie wpływa mniej istotnie na zużycie ściernie.

Praca zrealizowana w ramach badań własnych w AGH nr 10.10.110.316.

LITERATURA

- [1] Pietrzak K., Kaczmar J.W., Włosinski W., Wytwarzanie, własności i zastosowanie materiałów kompozytowych ceramiczno-metalowych, Seminarium Kompozyty, Częstochowa 1996, 65-81.
- [2] Konsztowicz K., Kompozyty wzmocnione włóknami, Podstawy technologii, Skrypt nr 1027, AGH, Kraków 1986.
- [3] Wojtaszek M., Wpływ kształtowania na gorąco na własności kompozytów aluminiowych wzmocnionych włóknami ceramicznymi, Rozprawa doktorska, Kraków 2000.
- [4] Strainer L.G., Optimisation of the wet lay up/vacuum bag process for CRFP composites, Composites 1989, 20, 5, 441--149.
- [5] Boey F.Y.C., Lye S.W., Effects of vacuum pressure in an autoclave curing process for a thermosetting fibre reinforced composite, Journal of Materials Processing Technology 1990, 23, 121-131.
- [6] Szczepanik S., Lehnert W., The formability of the Al-5%SiC composites obtained using P/M methods, Journal of Processing and Technology 1996, 60, 703-709.
- [7] Hutchings M., Tribological properties of metal matrix composites, Materials Science and Technology 1994, 10, 513-517.
- [8] Roy M., Venkataraman B., Bhanuprasad V., Mahajan Y.R., Sundararajan G., The effect of particulate reinforcement on the sliding wear behaviour of aluminium matrix composites, Metallurgical Transactions 1992, 23A, 2833-2847.
- [9] Lee C.S., Kim Y.H., Han K.S., Wear behaviour of aluminium matrix composite materials, Journal of Materials Science 1992, 27, 793-800.
- [10] Szczepanik S., Wyciskanie wyprasek z proszków i spieków stopów aluminium, Polska metalurgia w latach 1998-2002, Edytor K. Świątkowski, WN Akapit, Kraków 2002, 1, 344-360.

Recenzent
Jacek Kaczmar