

Marek Wojtaszek¹, Stefan Szczepanik², Karolina Doniec³

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

KSZTAŁTOWANIE NA GORĄCO W PROCESACH ZAGĘSZCZANIA I WYCISKANIA PROSZKU STOPU Al-Si-Fe-Cu ORAZ MIESZANINY TEGO PROSZKU I 10% CZĄSTEK SiC

Przedstawiono wyniki badań materiałów otrzymanych w technologii łączącej procesy przeróbki plastycznej oraz metalurgii proszków. Półwyroby przeznaczone do wyciskania wytworzono w procesie zagęszczania na gorąco w matrycach zamkniętych stopowego proszku Al₁₇Si₅Fe₃Cu₁Mg_{0,6}Zr oraz mieszaniny tego proszku i cząstek węgla krzemu w ilości 10% objętościowych. Zagęszczanie prowadzono w temperaturze 530°C, stosując nacisk jednostkowy 300 MPa przy czasie 7 min jego oddziaływania na materiał. Uzyskane w ten sposób półwyroby wyciskano w temperaturze 530°C, ze współczynnikiem wyciskania $\lambda = 13,7$, przy prędkości trawersy prasy 0,1 mm/s. Zarejestrowano wielkość sił podczas realizacji procesu wyciskania w funkcji przemieszczenia stempla (rys. 2). Badano wpływ składu chemicznego na względną gęstość (rys. 3) i twardość (rys. 4) wstępnie zagęszczonych na gorąco półwyrobów oraz po ich wyciskaniu. Określono także wytrzymałość na zginanie (rys. 5) i zużycie ściernie (rys. 6) wyciskanych tworzyw. Ocenie poddano powierzchnie przelomów wyciskanych materiałów (rys. 8), powstałe w próbie zginania w temperaturze otoczenia oraz ich struktury (rys. 7). Gęstości półwyrobów otrzymanych w procesie zagęszczania w temperaturze 530°C w matrycach zamkniętych stopowego proszku Al₁₇Si₅Fe₃Cu₁Mg_{0,6}Zr odpowiadają gęstości względnej litego materiału. Wyciskanie w temperaturze 530°C tych półwyrobów spowodowało spadek gęstości kompozytu 0,2±0,3%. W efekcie obecności fazy umacniającej w osnowie nastąpił wzrost twardości materiału. Po wyciskaniu w temperaturze 530°C była ona niższa niż półwyrobów o tym samym składzie chemicznym, otrzymanych w procesie zagęszczania na gorąco. Cząstki węgla krzemu wprowadzone do osnowy spowodowały podwyższenie wytrzymałości na ściskanie oraz zmniejszenie zużycia ściernego materiałów kształtowanych w procesie wyciskania na gorąco. Powierzchnie zniszczenia tych materiałów mają charakter kruchych przelomów. Obserwacje struktur materiałów powstałych po wyciskaniu na gorąco nie wykazały obecności porów, co potwierdza jakościowo wyniki uzyskane podczas badań gęstości (rys. 7).

Słowa kluczowe: stopy Al-Si-X, kompozyty, cząstki SiC, metalurgia proszków, zagęszczanie na gorąco w matrycach zamkniętych, wyciskanie na gorąco

HOT FORMING BY CONSOLIDATION AND EXTRUSION OF Al-Si-Fe-Cu POWDER AND MIXTURE OF THIS POWDER AND 10% SiC PARTICLES

The work presents the results of research of the materials obtained from powder using the technology that combined metal forming and powder metallurgy. Semi-finished products designed for the extrusion were produced by hot consolidation in closed-die the Al₁₇Si₅Fe₃Cu₁Mg_{0,6}Zr powder and mixture of this powder and 10 vol.% of silicon carbide particles. Consolidation process was performed at 530°C, at unit pressure 300 MPa and with stamp pressing time of 7 minutes. The semi-finished products obtained in this way were extruded at 530°C, at a traverse speed of 0.1 mm/s and at extrusion ratio $\lambda = 13,7$. The values of the forces which appear during extrusion in 530°C as a function of punch displacement were registered. The relative density (Fig. 3) and hardness (Fig. 4) for materials after hot consolidation and extrusion. The compression strength at room temperature (Fig. 5) and the abrasive wear (Fig. 6) for the extruded products were investigated. The fracture surfaces in a bending test at room temperature (Fig. 8) and the structures (Fig. 7) of hot extruded materials were estimated. Extrusion at 530°C caused material processing with invariable of relative density value. The addition of silicon carbide particles causes only insignificant drop in density of composite materials, in a range of 0.2±0.3%. Introducing the reinforced phase in the matrix leads to the increase of product hardness. The hardness of materials obtained by hot extrusion was lower than for semi-products by the same chemical composition, after hot consolidation in closed-die. In the case of the materials manufactured by hot extrusion, addition 10% of silicon carbide particles leads to the increase of the compression strength and abrasive wear results. The destruction surface of the materials, obtained by hot extrusion arose as a result of brittle cracking. Observation of the hot extruded products microstructures was confirmed by qualitative density measurements results (Fig. 7).

Keywords: Al-Si-X alloys, composites, SiC particles, powder metallurgy, hot consolidation in closed-die, hot extrusion

¹ dr inż., ² prof. dr hab. inż., ³ mgr inż.

WSTĘP

Stopy należące do grupy Al-Si-X znajdują szereg zastosowań w układach pracujących w umiarkowanie wysokich temperaturach, gdzie wymagane są takie właściwości, jak: mała gęstość, odporność na zużycie ścierne i korozję oraz niska rozszerzalność cieplna. Są one od lat stosowane do wytwarzania różnego typu elementów konstrukcyjnych, między innymi pracujących przy wysokich obciążeniach tłoków silników spalinowych lub wykonywanych już w latach siedemdziesiątych technologią odlewania ciśnieniowego bloków silnikowych [1]. W przypadku tego typu tworzyw bardzo ważnym czynnikiem jest uzyskanie nie tylko dobrych własności wytrzymałościowych, lecz także odporności na zużycie ścierne w możliwie szerokim zakresie temperatur. Jedną z metod uzyskania takich własności jest wprowadzenie miedzi jako składnika stopów typu aluminium-krzem w ilości do 5,5% mas. Występująca w układzie równowagi fazowej aluminium-miedź zmienna rozpuszczalność w stanie stałym pozwala na zastosowanie zabiegów przesycania i starzenia, co powoduje efekt umocnienia wydzieleniowego. Inną metodą jest tworzenie kompozytów na osnowie tych stopów przez wprowadzenie twardych cząstek, niewchodzących w reakcje chemiczne z osnową. Obserwuje się rozwój w dziedzinie wytwarzania i stosowania materiałów umocnionych cząstkami fazy twardej [2, 3].

Na strukturę i własności stopów z grupy Al-Si-Fe-Cu otrzymywanych w procesach odlewniczych mają wpływ takie czynniki, jak: skład chemiczny, prędkość chłodzenia podczas krzepnięcia oraz obróbka cieplna. W przypadku kompozytów umacnianych cząstkami, oprócz ich rodzaju, wielkości oraz udziału objętościowego w osnowie, istotny jest sposób rozprzodzenia cząstek w ciekłej osnowie, który ma wpływ na ich rozmieszczenie. Istotnymi wadami wytwarzanych tą technologią tworzyw są bardzo wysoka twardość oraz nadmierna wielkość pierwotnych cząstek krzemu, co obniża ich wytrzymałość i powoduje trudności podczas obróbki skrawaniem. Pomimo że stopy odlewnicze są od wielu lat w użyciu, poszukuje się alternatywnych metod otrzymywania tych materiałów. Do postrzeganych za interesujące i chętnie badanych w wielu ośrodkach w świecie należy grupa metod opartych zarówno na technologii metalurgii proszków [4], jak i na łącznym wykorzystaniu tej technologii oraz procesów przeróbki plastycznej [5]. W przypadku stosowania tych metod do otrzymywania kompozytów umacnianych cząstkami równomierne rozprzodzenie fazy umacniającej w osnowie nie stanowi problemu i odbywa się z wykorzystaniem prostej do realizacji i kontroli operacji mieszania. Kucie lub wyciskanie są typowymi operacjami przeróbki plastycznej, prowadzącymi do dogęszczenia kompozytów oraz nadania im wymaganych własności [2, 6].

W procesach kształtowania na gorąco w roli wsadu mogą być wykorzystywane zarówno wypraski, jak i mieszaniny proszków [7]. Stosując odpowiednie oprzyrządowanie, operacje te można prowadzić za pomocą urządzeń standardowo używanych do kształtowania litych tworzyw [7-10]. Wykorzystując technologię łączącą procesy przeróbki plastycznej i metalurgię proszków, możliwe jest wytwarzanie materiałów na osnowie stopów typu Al-Si-Fe-Cu o własnościach konkurencyjnych w odniesieniu do ich odpowiedników otrzymywanych klasycznymi metodami. Przykładem są między innymi głowice cylindrów stosowane w odtwarzaczach video [4].

BADANIA WŁASNE

Cel badań i ich zakres

Celem badań podjętych w tej pracy jest opracowanie własności tworzyw po procesie zagęszczania na gorąco proszku Al17Si5Fe3Cu1,1Mg0,6Zr i kompozytu na jego osnowie oraz po ich dodatkowym wyciskaniu na gorąco. Jako materiał do badań zastosowano podsitową frakcję proszku Al17Si5Fe3Cu1,1Mg0,6Zr o handlowej nazwie Osprey S230 oraz mieszaninę tego proszku i cząstek węgla krzemu SiC₁₀₀₀ w ilości 10% objętościowych.

Dla otrzymanych materiałów po zagęszczeniu określono względną gęstość i twardość, a dla materiałów po wyciskaniu względną gęstość, twardość, wytrzymałość na zginanie oraz zużycie ścierne. Przeprowadzono także obserwacje struktur na mikroskopie świetlnym oraz przełomów powstałych w wyniku zginania - na mikroskopie skaningowym. Składy chemiczne zastosowanych proszków podano w tabelach 1 i 2, a ich morfologię na rysunku 1.

TABELA 1. Skład chemiczny proszku Osprey S230

TABLE 1. Chemical composition of Osprey S230 powder

Si, %	Fe, %	Cu, %	Mg, %	Zr, %	Al, %
17,0	5,0	3,0	1,1	0,6	reszta

TABELA 2. Skład chemiczny cząstek SiC₁₀₀₀

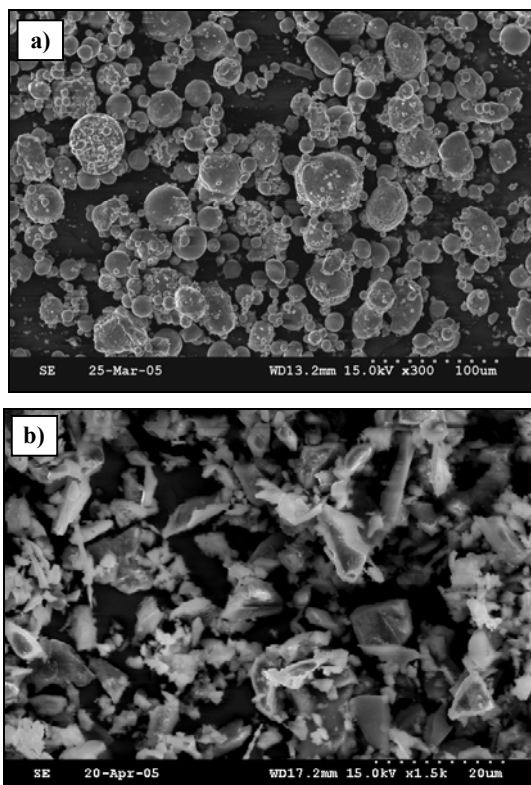
TABLE 2. Chemical composition of SiC₁₀₀₀ particles

Fe ₂ O ₃ , %	C, %	SiC, %
0,8	0,3	reszta

Mieszanę do badań otrzymano z proszku Osprey S230 i cząstek węgla krzemu w ilości 10% obj. w procesie mieszania na sucho w mieszalniku dwustopniowym przez 1 h, z prędkością obrotową 0,9 s⁻¹.

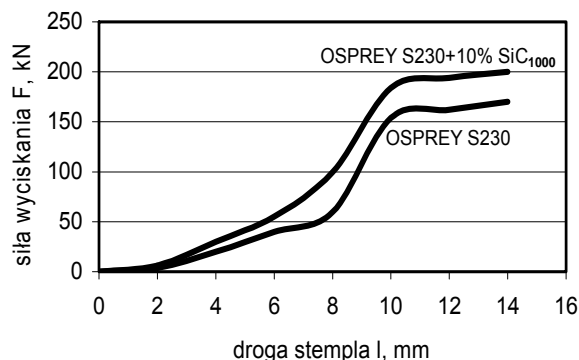
Zagęszczanie proszku osnowy oraz mieszaniny tego proszku i cząstek węgla krzemu przeprowadzono

w temperaturze 530°C. Proces zagęszczania tych materiałów realizowano w matrycach podgrzanych do założonej temperatury na prasie hydraulicznej ZD-100. Średnica stempla wynosiła 37,5 mm. Zagęszczanie prowadzono przy następujących parametrach technologicznych: temperatura narzędzi 530°C, czas nagrzewania wsadu 7 minut, nacisk jednostkowy stempla 300 MPa oraz czas jego przetrzymania 3 minuty.



Rys. 1. Morfologia cząstek proszków: a) Osprey S230, b) węgla krzemu SiC₁₀₀₀

Fig. 1. Morphology of powders particles: a) Osprey S230, b) silicone carbide SiC₁₀₀₀



Rys. 2. Przebieg zmian sił w funkcji drogi stempla podczas wyciskania w temperaturze 530°C. Współczynnik wyciskania $\lambda = 13,7$

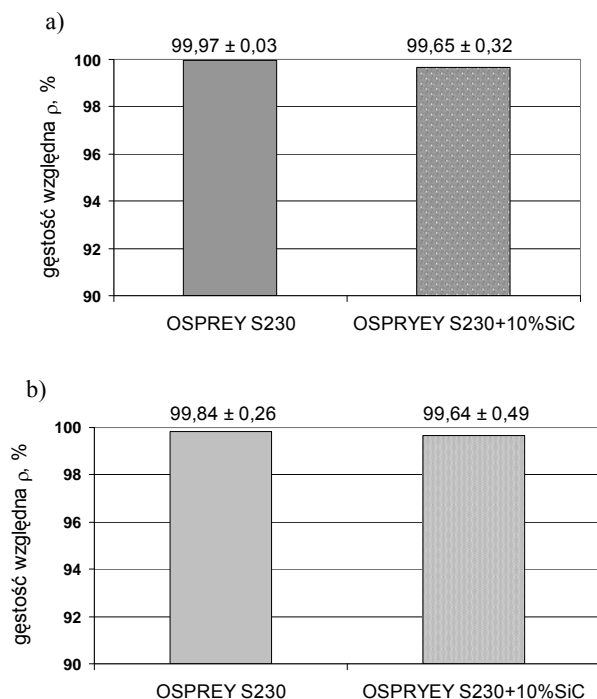
Fig. 2. Values of the forces which appear during extrusion in 530°C as a function of punch displacement. Extrusion ratio $\lambda = 13,7$

Część wyrobów otrzymanych w procesie zagęszczania poddano wyciskaniu z zastosowaniem oczka o kącie wierzchołkowym 90° przy następujących parametrach

technologicznych: temperatura narzędzi 530°C, temperatura wsadu 530°C, prędkość trawersy prasy 0,1 mm · s⁻¹, współczynnik wyciskania $\lambda = 13,7$. Podczas wyciskania rejestrowano wielkość siły w zależności od przemieszczenia stempla. Przebieg zmian sił wyciskania w funkcji przemieszczenia stempla dla materiału niemocnionego oraz dla kompozytu o zawartości 10% obj. węgla krzem zestawiono na rysunku 2.

Wyniki badań i ich analiza

Gęstość. Gęstości wyprasek określono metodą Archimedes'a, prowadząc pomiary ich mas na powietrzu oraz w wodzie. Wyniki pomiaru gęstości próbek wstępnie zagęszczanych na gorąco zestawiono na rysunku 3a, a po ich wyciskaniu na gorąco - na rysunku 3b. W efekcie zagęszczania luźno zasypanego do matrycy proszku przy przyjętych do badań parametrach uzyskano materiał o dużym zagęszczeniu. Wyciskanie nie spowodowało zmiany jego zagęszczenia. Gęstość materiału kompozytowego jest mniejsza o około 0,2÷0,3% w odniesieniu do materiału osnowy.

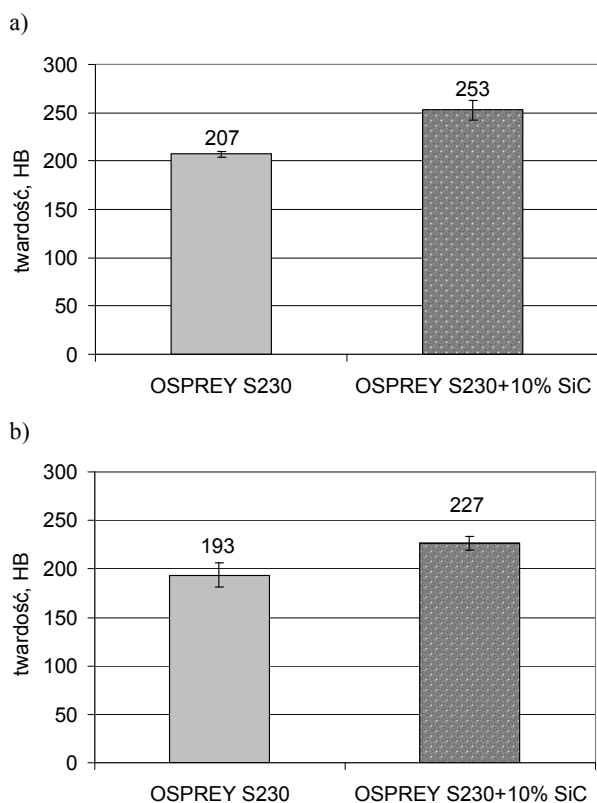


Rys. 3. Gęstość względna tworzyw otrzymanych z proszku Osprey S230 oraz z mieszaniny tego proszku i cząstek węgla krzem SiC₁₀₀₀ w procesach: a) zagęszczania w temperaturze 530°C, b) wyciskania w temperaturze 530°C wstępnie zagęszczonych półwyrobów

Fig. 3. The relative density of the materials obtained from Osprey S230 powder and mixture of this powder with 10% SiC₁₀₀₀ particles after: a) consolidation at 530°C, b) extrusion at 530°C semi-products after consolidation

Twardość. Pomiary twardości przeprowadzono metodą Brinella. Wyniki badań twardości, odpowiednio dla materiałów zagęszczanych na gorąco oraz po ich wyciskaniu na gorąco, przedstawiono na rysunku 4.

W procesie zagęszczania w temperaturze 530°C proszku Osprey S230 uzyskano próbki o twardości 207 ± 3 HB. Materiał kompozytowy ma wyższą twardość, która wynosi 253 ± 10 HB. W wyniku dalszego przetworzenia na drodze wyciskania w temperaturze 530°C wstępnie zagęszczonych tworzyw nastąpiło obniżenie ich twardości, niezależnie od składu chemicznego. Twardość materiału osnowy po tym procesie wynosi 193 ± 12 HB, a kompozytu 227 ± 7 HB.



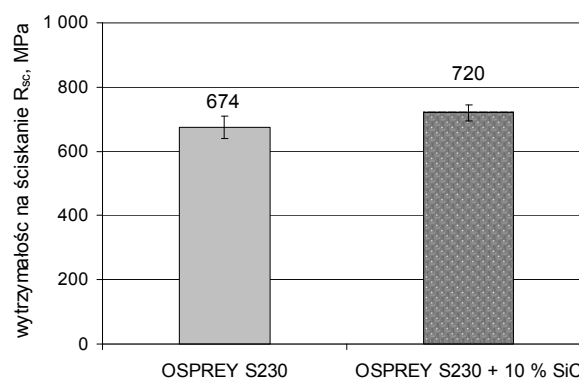
Rys. 4. Twardość Brinella materiałów z proszku Osprey S230 oraz z mieszaniny tego proszku i cząstek węgla krzemu SiC_{1000} po procesach: a) zagęszczania w temperaturze 530°C, b) wyciskania w temperaturze 530°C wstępnie zagęszczonych półwyrobów

Fig. 4. The Brinell hardness of the materials from Osprey S230 powder and mixture of this powder with 10% SiC_{1000} particles after: a) consolidation at 530°C, b) extrusion at 530°C semi-products after consolidation

Próba ściskania. Statyczną próbę ściskania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron 1196 w temperaturze otoczenia i z prędkością 0,08 mm/s. Wytrzymałość na ściskanie tworzyw otrzymanych w procesie wyciskania w temperaturze 530°C wstępnie zagęszczonych na gorąco półwyrobów przedstawiono na rysunku 5. Średnia wytrzymałość na ściskanie tych tworzyw wynosi 674 ± 34 MPa, a dla kompozytu o zawartości 10% obj. cząstek węgla krzemu SiC_{1000} 720 ± 24 MPa.

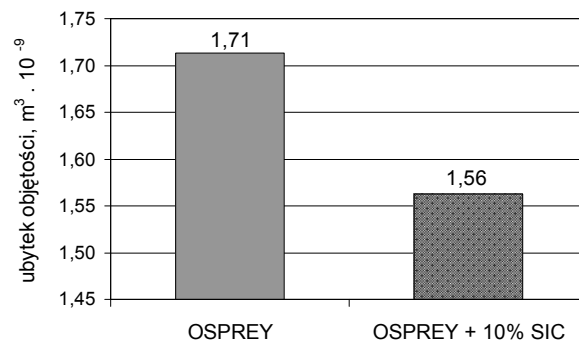
Badania zużycia ściernego. Przeprowadzono badania porównawcze zużycia ściernego wyrobów uzyskanych w procesie wyciskania wsadu, otrzymanego

w wyniku zagęszczania na gorąco proszku Osprey S230 oraz jego mieszaniny z 10% obj. cząstek węgla krzemu. Do badań zastosowano tarczę wykonaną ze stali szybko tnącej o twardości 68 HRC, średnicy 125 mm i grubości 4 mm. Ścieranie prowadzono na drodze tarcia 5000 m przy prędkości obrotowej tarczy 110 obr/min. Następnie próbka była czyszczona ultradźwiękowo w izopropanolu i ważona na wadze analitycznej z dokładnością 10^{-4} g w celu określenia ubytku masy. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 6. Próby wykazały około 10% mniejsze zużycie kompozytu w odniesieniu do materiału osnowy.



Rys. 5. Wytrzymałość na ściskanie tworzyw otrzymanych w procesie wyciskania w temperaturze 530°C wstępnie zagęszczonych na gorąco: proszku Osprey S230 oraz mieszaniny tego proszku i 10% objętościowych cząstek SiC_{1000}

Fig. 5. The compression strength of the materials after extrusion at 530°C semi-products obtained by hot consolidation of Osprey S230 powder and mixture of this powder with 10% SiC_{1000} particles

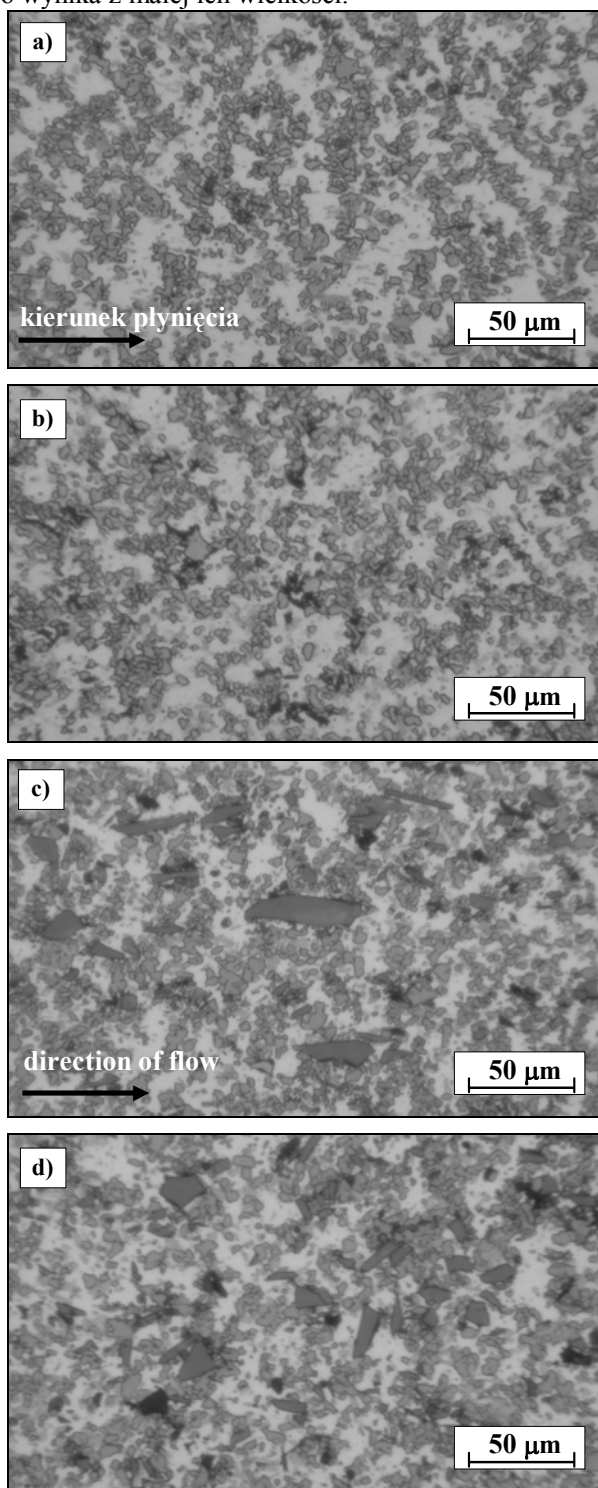


Rys. 6. Zużycie ściernie otrzymanych w procesie wyciskania w temperaturze 530°C półwyrobów z zagęszczanego na gorąco proszku Osprey S230 oraz mieszaniny tego proszku i 10% obj. cząstek SiC_{1000}

Fig. 6. The abrasive wear of the extruded at 530°C materials obtained by hot consolidation of Osprey S230 powder and mixture of this powder with 10% SiC_{1000} particles

Badania metalograficzne. Badania metalograficzne materiałów wyciskanych przeprowadzono z zastosowaniem mikroskopii świetlnej oraz skaningowej mikroskopii elektronowej. Na rysunku 7 przedstawiono mikrostruktury materiałów osnowy i kompozytu. Struktura wyciskanych tworzyw jest drobnoziarnista i regularna. Na zglądach wzdłużnych (rys. 7a, c) nie obserwuje się

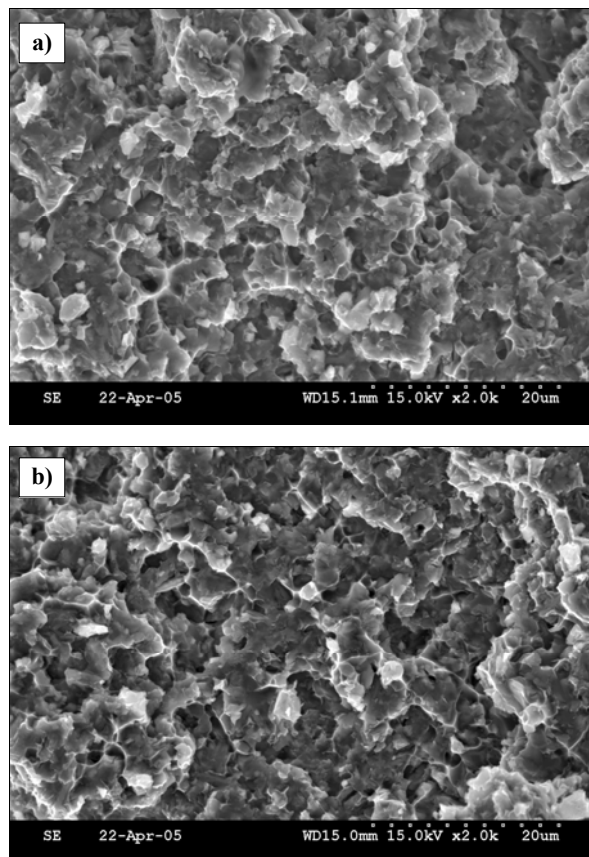
znieszczenia ziaren w kierunku płynięcia materiału, co wynika z małej ich wielkości.



Rys. 7. Struktury materiałów, otrzymanych w procesie wyciskania w temperaturze 530°C półwyrobów po zagęszczaniu na gorąco: a, b) proszku Osprey S230, c, d) mieszaniny tego proszku i cząstek węgla krzemu SiC_{1000} , w ilości 10% obj., a, c) zglądy wzdłużne, b, d) zglądy poprzeczne. Zgląd trawiony

Fig. 7. Structures of the materials after extrusion at 530°C semi-products made by hot consolidation: a, b) Osprey S230 powder, c, d) mixture of this powder with 10% SiC_{1000} particles, a, c) longitudinal sections, b, d) cross sections. After etching

Uporządkowane ułożenie fazy umacniającej w osnowie, zgodne z kierunkiem procesu wyciskania, stwierdzono dla kompozytów z cząstkami węgla krzemu, co pokazane jest na rysunku 7c. Cząstki węgla krzemu są rozmieszczone w osnowie dość równomiernie, co jest widoczne na zglądach wzdłużnych i poprzecznych kompozytu (rys. 7c, d).



Rys. 8. Powierzchnie zniszczenia próbek po zginaniu wyciskanych w temperaturze 530°C półwyrobów z zagęszczanego na gorąco: a) proszku Osprey S230, b) mieszaniny tego proszku i cząstek węgla krzemu SiC_{1000} , w ilości 10% obj.

Fig. 8. Structure surfaces of the materials after extrusion at 530°C semi-products made by hot consolidation: a) Osprey S230 powder, b) mixture of this powder with 10% SiC_{1000} particles

Podczas obserwacji mikrostruktur osnowy i kompozytu nie stwierdzono obecności pustek, nieciągłości lub porów. Powierzchnie zniszczeń tych tworzyw, powstałe w wyniku trójpunktowego zginania próbek w temperaturze otoczenia, zestawiono na rysunku 8. Powierzchnie przełomów są drobnoziarniste.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań wyciskania w temperaturze 530°C wstępnie zagęszczanego na gorąco w matrycach zamkniętych proszku stopu $\text{Al}_{17}\text{Si}_5\text{Fe}_3\text{Cu}_{1,1}\text{Mg}_{0,6}\text{Zr}$ oraz mieszaniny tego proszku i cząstek węgla krzemu SiC_{1000} w ilości 10% obj. można stwierdzić, że:

1. Do wyciskania wyprasek z materiału kompozytowego konieczna jest większa siła niż dla materiału osnowy.
 2. W wyniku zagęszczania w matrycach zamkniętych proszku Osprey S230 oraz jego mieszaniny z cząstkami węgla krzemu SiC_{1000} w ilości 10% obj., przy przyjętych do badań parametrach, uzyskano tworzywo o gęstości litego materiału. Dalsze przetworzenie tego materiału na drodze wyciskania w temperaturze 530°C ze współczynnikiem wyciskania 13,7 odbywa się bez zmiany jego gęstości.
 3. Materiał kompozytowy ma wyższą twardość HB zarówno po zagęszczaniu na gorąco półwyrobów, jak i po wyciskaniu w odniesieniu do twardości materiału osnowy. Materiały wyciskane w temperaturze 530°C ze współczynnikiem wyciskania 13,7 mają niższą twardość niż jedynie zagęszczane w tej temperaturze.
 4. Wytrzymałość na ścislenie materiału kompozytowego po wyciskaniu jest większa oraz mniejsze jest jego zużycie ściernie w odniesieniu do wyciskanych tworzyw z proszku osnowy.
 5. Kształtowanie na gorąco w procesach wstępnego zagęszczania, a następnie wyciskania, przy przyjętych parametrach, doprowadziło do otrzymania tworzywa o regularnej i drobnoziarnistej strukturze. Obserwacje mikrostruktur osnowy oraz kompozytu nie wykazały obecności porów.
- [3] Pippan R., Weinert P., Stüve H.P., Threshold of fatigue crack propagation in Al and Al - composites, The 4th European Conference on Advanced Materials and Processes EUROMAT 95, Padua-Venice, 113.
 - [4] Hirano T., Ohmi F., Horie S., Kiyota F., Fuita T., Rapidly Solidified Materials, Proc. International Conference 1985, 327.
 - [5] Satoch T., Okimoto K., Nischida S., Matsuki K., Superplastic like behaviour of rapid solidification processed hyper eutectic Al-Si P/M alloys, Scripta Metallurgica et Materialia 1995, 33, 5, 819-824.
 - [6] Wojtaszek M., Wpływ kształtowania na gorąco własności kompozytów aluminiowych, umocnionych włóknami ceramicznymi, Praca doktorska, Kraków 2000.
 - [7] Wojtaszek M., Szczepanik S., Wybrane własności kompozytów aluminium - cząstki węgla krzemu otrzymanych z proszków w procesie kucia na gorąco i po odkształcaniu na zimno, Kompozyty (Composites) 2005, 5, 3, 70-76.
 - [8] Wojtaszek M., Szczepanik S., Wybrane własności kompozytu aluminium - cząstki węgla krzemu otrzymanego przez wyciskanie wyprasek z proszku, Kompozyty (Composites) 2003, 3, 8, 415-420.
 - [9] Szczepanik S., Wojtaszek M., Wiśniewski B., The influence of the extrusion temperature of PM {Al-Cu-Si} alloy preforms on the structure and properties of the products, Metal Forming 2004, Proceedings 10th International Conference on Metal Forming, Kraków, Poland, September 19-22, 2004, Vol. 1, eds. Jan Kusiak et al., Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków; University of Birmingham, United Kingdom, Bad Harzburg, GRIPS media GmbH 2004, 717-721.
 - [10] Szczepanik S., Wojtaszek M., Krawiarz J., Wpływ temperatury wyciskania na strukturę i własności kompozytów otrzymywanych z wyprasek z proszku stopu Al8,84%Cu6, 33%Si0,65%Mg i cząstek węgla krzemu, Kompozyty (Composites) 2004, 4, 12, 351-358.

LITERATURA

- [1] Hatch J.E., Aluminium, Properties and Physical Metallurgy, ASM, Metals Park 1984, 346-347.
- [2] Szczepanik S., Lehnert W., The formability of the Al-5% SiC composite obtained using P/M method, Journal of Materials Processing Technology 1996, 60, 703-709.

Recenzent
Maria Trzaska