

Marek Wojtaszek¹, Stefan Szczepaniak²

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

WYBRANE WŁASNOŚCI KOMPOZYTÓW ALUMINIUM-CZĄSTKI WĘGLIKA KRZEMU OTRZYMANYCH Z PROSZKÓW W PROCESIE KUCIA NA GORĄCO I PO ODKSZTAŁCANIU NA ZIMNO

Przedstawiono wyniki badań materiałów otrzymanych w technologii łączącej procesy metalurgii proszków oraz przeróbki plastycznej. Półwyroby do badań wytworzono w procesie kucia w temperaturze 500°C wyprasek z proszku aluminium RAI-1 oraz kompozytów na osnowie tego proszku umocnionych poprzez wprowadzenie cząstek węgla krzemu w ilości 5 i 10% obj. Uzyskane tworzywa odkształcano na zimno, stosując gnioty 8 i 25%. Badano wpływ udziału objętościowego cząstek węgla krzemu w osnowie oraz wpływ odkształcenia na zimno i jego wielkości na względną gęstość (rys. 3), twardość (rys. 4) oraz strukturę otrzymanych materiałów. Zachowanie tworzyw podczas ich odkształcania analizowano poprzez skonstruowanie dla nich krzywych płynięcia w temperaturze otoczenia oraz w podwyższonych temperaturach (rys. rys. 5 i 6). Na podstawie przeprowadzonych badań otrzymywania w procesie kucia na gorąco wyrobów z rozpylanego proszku aluminium i kompozytów na jego osnowie wzmocnianych cząstkami węgla krzemu można stwierdzić, że proponowana technologia kształtowania umożliwia otrzymanie wyrobów o wysokich gęstościach względnych, a wprowadzenie węgla krzemu obniża gęstość względną wyrobów. Wprowadzenie fazy umacniającej do aluminiowej osnowy lub odkształcanie na zimno powoduje wzrost twardości produktu. Podczas jednoosiowego ściskania tworzyw zmiany temperatury do 150°C nie spowodowały znaczących spadków naprężeń koniecznych do uzyskania danego odkształcenia, a w temperaturze 200°C naprężenie, przy którym przebiega płynięcie, znacznie się obniża. Dla osnowy i kompozytu o zawartości 5% obj. cząstek węgla krzemu odkształcenie na zimno po kuciu powoduje umocnienie materiału. W wyniku wprowadzenia do osnowy 5% obj. cząstek węgla krzemu rośnie naprężenie konieczne do uzyskania określonego odkształcenia, niezależnie od temperatury próby i wielkości gniotu na zimno po kuciu. Kompozyt o zawartości 10% obj. cząstek węgla krzemu ulega zniszczeniu w efekcie oddziaływania niższych naprężeń i odkształceń niż materiał osnowy.

Słowa kluczowe: kompozyty Al-SiC, metalurgia proszków, kucie na gorąco, odkształcanie, krzywe umocnienia

SELECTED PROPERTIES OF ALUMINIUM-SILICON CARBIDE COMPOSITES OBTAINED FROM POWDERS BY HOT FORGING AND COLD WORKING

The work presents the results of research of materials obtained from powder using the technology that combined powder metallurgy and metal forming. Semi-finished products for the research were produced by forging the aluminium powder compacts and composite compacts containing 5 and 10 vol.% of silicon carbide particles at 500°C in closed-die. The obtained materials were cold-formed at room temperature with the reduction of height 8 or 25%. The volumetric content of the particles of SiC in the matrix and the influence of cold deformation on the relative density (Fig. 3), hardness (Fig. 4) and microstructure were investigated. Flow curves at room temperature and at elevated temperatures (Figs 5 and 6) were elaborated in order to analyse the behaviour of the materials during deformation. Basing on the realized research concerning hot forging of products obtained from aluminium powder and aluminium based composites reinforced with silicon carbide particles, it can be stated that the proposed forming technology makes it possible to obtain products showing high relative densities. It was found, that the addition of silicon carbide particles lowered the density of composite materials. Evaluation of the product microstructures qualitative confirmed density measurements results. Introducing the strengthening phase into aluminium matrix or cold forming leads to the increase of product hardness. During uniaxial compression test the change of temperature up to 150°C did not cause any significant drop in the stresses indispensable to obtain specified deformation, while at 200°C flow stress lowers significantly. In case of the aluminium matrix and composite with 5% silicon carbide volume fraction the flow stress increases, regardless of the test temperature and the amount of cold deformation after forging. Composite material with 10% silicon carbide volume fraction undergoes a failure under lower stresses and deformations when compared with aluminium matrix without silicon carbide particles.

¹ dr inż., ² prof dr hab. inż.

Key words: Al-SiC composites, powder metallurgy, hot forging, deformation, flow curves

WSTĘP

Kompozyty na osnowie aluminium lub jego stopów umocnione przez cząstki ceramiczne znajdują obecnie coraz szersze zastosowanie, głównie w przemyśle motoryzacyjnym oraz lotniczym. Często stosowanym materiałem umacniającym osnowę są w tym przypadku cząstki tlenku glinu lub węgla krzemu. Proces technologiczny wytwarzania kompozytów aluminium-cząstki ceramiczne prowadzi się zwykle w taki sposób, aby uzyskać możliwie równomierne rozmieszczenia fazy umacniającej w osnowie. W szczególnych przypadkach, gdy np. wymagana jest poprawa odporności na ścieranie jedynie warstwy wierzchniej i przypowierzchniowej przy jednoczesnym zachowaniu własności plastycznych rdzenia, stosuje się metody prowadzące do gradientowego rozmieszczenia cząstek [1, 2]. Jedną z metod, które pozwalają na otrzymanie kompozytów o równomiernym rozmieszczeniu cząstek fazy umacniającej w osnowie oraz korzystnych własnościach mechanicznych i użytkowych, jest zastosowanie w sposób łączny technologii metalurgii proszków oraz przeróbki plastycznej [3-6]. Równomierność rozmieszczenia cząstek w osnowie kompozytu zapewnia się przede wszystkim poprzez odpowiedni dobór wielkości cząstek proszku osnowy i fazy umacniającej oraz zastosowanie poprawnych parametrów procesu mechanicznego mieszania składników. Mieszaninę składników najczęściej poddaje się prasowaniu na zimno lub na gorąco. Jako wsad do kształtowania na gorąco mogą być stosowane zarówno wypraski, jak i mieszaniny proszków. Warunkiem niezbędnym do uzyskania drogą metalurgii proszków kompozytu o wysokich własnościach jest jego zagęszczenie do gęstości nie mniejszej niż 95% materiału litego [7]. Można to osiągnąć w procesach przeróbki plastycznej na gorąco, takich jak np. wyciskanie czy kucie.

Oprócz określanych standardowo własności fizycznych, mechanicznych oraz użytkowych tworzyw otrzymanych poprzez łączne zastosowanie technologii metalurgii proszków oraz przeróbki plastycznej, niezwykle ważna i przydatna jest informacja o zachowaniu się tych materiałów podczas odkształcania w temperaturze otoczenia oraz w podwyższonych temperaturach. Wykorzystać ją można między innymi do przeprowadzenia symulacji procesu jego kształtowania z zastosowaniem metody elementów skończonych, co z kolei prowadzi do uzyskania jakościowych danych, opisujących zachowanie tworzyw w poszczególnych stadiach procesu kształtowania konkretnego wyrobu [8, 9].

Krzywe umocnienia można opracować zarówno dla materiału bezpośrednio po kształtowaniu na gorąco,

jak również po uprzednim poddaniu go odkształcaniu na zimno. W tym ostatnim przypadku blokowanie systemów poślizgu nakładać się będzie z efektem umocnienia spowodowanym przez wprowadzenie cząstek fazy umacniającej do osnowy.

BADANIA WŁASNE

Cel badań

Celem podjętych badań było określenie wpływu udziału fazy umacniającej i odkształcenia na zimno na gęstość, twardość i oraz przebieg krzywych umocnienia materiałów otrzymanych w procesie kucia w temperaturze 500°C wyprasek z proszku aluminium oraz kompozytów na osnowie tego proszku, umocnionych cząstkami węgla krzemu SiC₁₀₀₀.

Metodyka badań

Na osnowę zastosowano rozpylany proszek aluminium RAI-1 o gęstości teoretycznej 2700 kg/m³. Skład chemiczny proszku aluminium zestawiono w tabeli 1, a jego skład ziarnowy w tabeli 2. Jako fazy umacniającej osnowę użyto cząstek węgla krzemu SiC₁₀₀₀ o wielkości cząstek poniżej 10 μm, gęstości teoretycznej 3200 kg/m³ i składzie chemicznym zestawionym w tabeli 3.

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

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

TABELA 2. Analiza ziarnowa proszku aluminium RAI-1
TABLE 2. Size analysis of aluminium RAI-1 powder

Wielkość ziaren mm	> 0,16	0,16÷0,10	0,10÷0,071	0,071÷0,063	0,063÷0,056	0,056÷0,04	< 0,04
Udział wagowy %	-	0,3	1,16	4,51	0,98	69,83	21,12

TABELA 3. Skład chemiczny cząstek SiC₁₀₀₀
TABLE 3. Chemical composition of SiC₁₀₀₀ particles

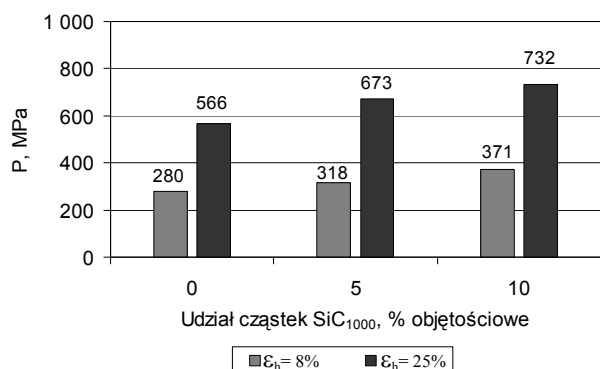
Fe ₂ O ₃ , %	C, %	SiC, %
0,8	0,3	reszta

Składniki odważano w takich proporcjach, aby uzyskać mieszaniny o składach odpowiednio 5 i 10% obj. cząstek węgla krzemu w aluminium, a następnie mieszano na sucho przez 60 minut z prędkością $0,9 \text{ s}^{-1}$. Odważki mieszanin oraz proszku aluminium RAI-1 o masie około 65 g prasowano w temperaturze otoczenia. Nacisk jednostkowy prasowania wyznaczono w oparciu o krzywą zagęszczania proszku aluminium RAI-1 w taki sposób, aby gęstość wyprasek wynosiła około 80%. Na tej podstawie określono siłę prasowania, która wynosiła 230 kN. Zastosowanie stałej siły prasowania, niezależnie od składu chemicznego mieszanin, miało na celu ocenę wpływu obecności cząstek węgla krzemu oraz jego udziału objętościowego w osnowie na zagęszczenie wyprasek podczas prasowania na zimno. Wypraski nagrzewano w piecu rurowym przez 30 minut w temperaturze 500°C , następnie przenoszono do wykroju podgrzewanej matrycy zamkniętej znajdującej się w gnieździe prasy śrubowej PS 100 i kuto. Otrzymane w ten sposób odkuwki odkształcano w temperaturze otoczenia, stosując gnioły ε_h odpowiednio 8 i 25%. Dla materiałów kutyh na gorąco oraz kutyh na gorąco i następnie spęczanych na zimno wyznaczono względną gęstość, określono twardość oraz opracowano krzywe umocnienia w temperaturze otoczenia i w podwyższonych temperaturach.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Naciski jednostkowe spęczania

Podczas odkształcania próbek w temperaturze otoczenia mierzono siłę spęczania, w oparciu o którą wyznaczono wartości nacisków jednostkowych, niezbędnych do ich odkształcenia z założonymi gniołami. Wartości nacisków jednostkowych podczas spęczania w zależności od wielkości gniołu oraz od składu chemicznego próbek zestawiono na rysunku 1. Wzrost udziału objętościowego cząstek węgla krzemu w osnowie powodował w każdym przypadku zwiększenie nacisku jednostkowego wymaganego do odkształcenia z zadanygniołem.



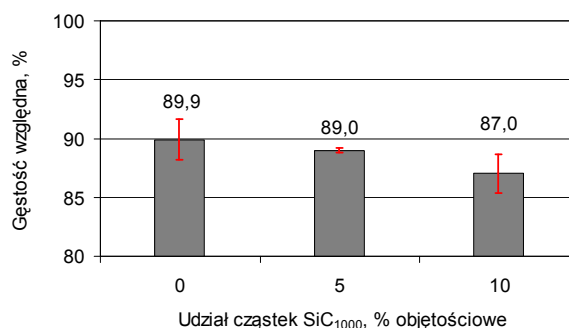
Rys. 1. Wpływ składu chemicznego oraz wielkości gniołu ε_h na nacisk jednostkowy podczas spęczania materiałów otrzymanych w procesie kucia w temperaturze 500°C wyprasek z proszku aluminium i kompozytów aluminium-cząstki węgla krzemu

Fig. 1. The influence of SiC particles content and the reduction of height ε_h on the unit pressure during cold forming of materials obtained by forging of aluminium powder compacts and Al-SiC composites at 500°C

Gęstość

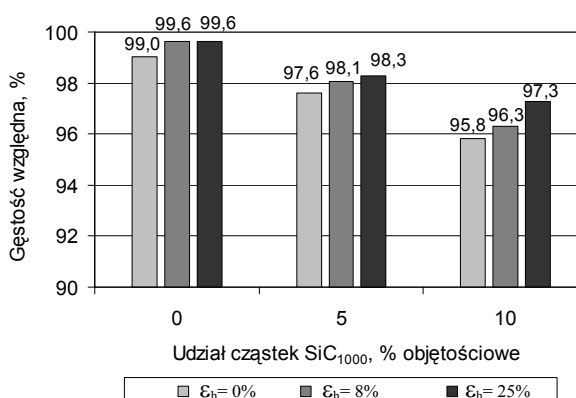
Gęstości wyprasek określono metodą geometryczną. Wyniki zestawiono na rysunku 2. Wprowadzenie do proszku aluminium cząstek węgla krzemu oraz zwiększenie jego udziału w mieszaninie spowodowało niewielkie obniżenie gęstości wyprasek.

Określone metodą Archimedesesa gęstości wyrobów z aluminium oraz kompozytów na jego osnowie umocnionych cząstkami węgla krzemu, otrzymanych w procesie kucia w temperaturze 500°C oraz kutyh, a następnie odkształczanych w temperaturze otoczenia, zestawiono na rysunku 3. Podobnie jak w przypadku wyprasek, wprowadzenie do aluminiowej osnowy węgla krzemu lub zwiększenie jego udziału objętościowego w osnowie spowodowało spadek gęstości kutyh tworzyw, przy czym porowatość kompozytu o zawartości 10% obj. węgla krzemu utrzymała się poniżej 5%. Spęczanie tych tworzyw w temperaturze otoczenia powodowało poprawę ich zagęszczenia, proporcjonalnie do wielkości zastosowanego odkształcenia.



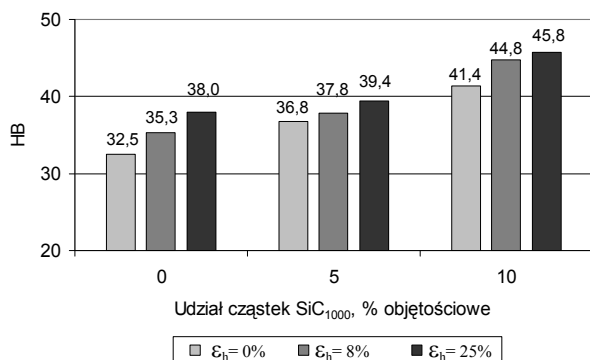
Rys. 2. Wpływ składu chemicznego na gęstość względną wyprasek z proszku aluminium RAI-1 oraz kompozytów na osnowie tego proszku, umocnionych cząstkami węgla krzemu SiC₁₀₀₀

Fig. 2. The influence of SiC particles content on the relative density of the forgings from aluminium powder and Al-SiC composites



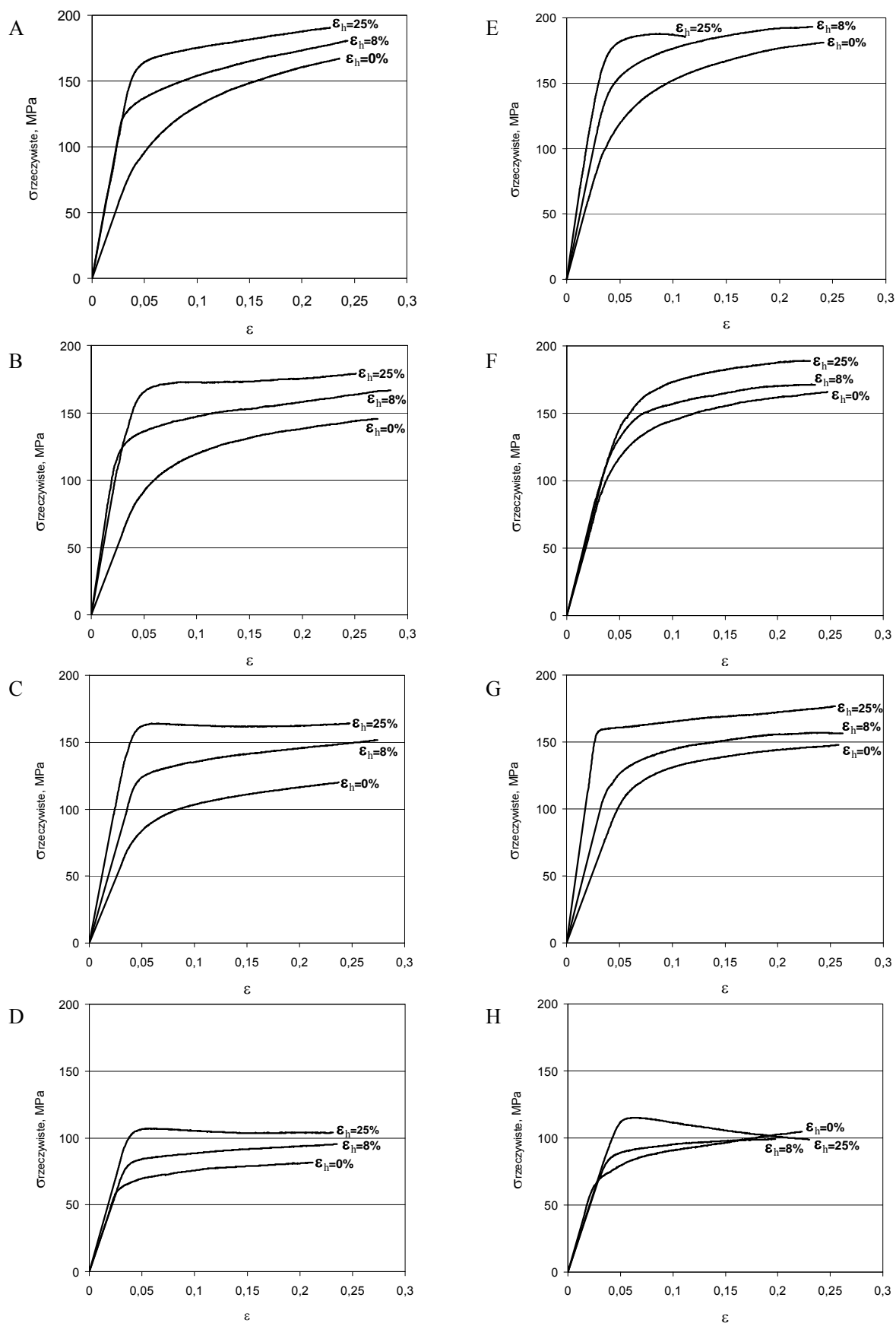
Rys. 3. Wpływ składu chemicznego i wielkości gniotu ε_h na gęstość względną wyrobów z proszku RAl-1 i kompozytów na jego osnowie umocnionych cząstkami węgla krzemu SiC_{1000} , otrzymanych przez kucie w temperaturze 500°C oraz dodatkowo speczanych w temperaturze otoczenia

Fig. 3. The influence of SiC particles content and the reduction of height ε_h on the relative density of the forgings from aluminium and Al-SiC composites after forging at 500°C and cold forming at room temperature



Rys. 4. Wpływ składu chemicznego i wielkości gniotu ε_h na twardość Brinella wyrobów z proszku RAl-1 i kompozytów na jego osnowie umocnionych cząstkami węgla krzemu SiC_{1000} , otrzymanych przez kucie w temperaturze 500°C oraz dodatkowo odkształczanych w temperaturze otoczenia

Fig. 4. The influence of SiC particles content and the reduction of height ε_h on the Brinell hardness of the forgings obtained from aluminium and Al-SiC composites after forging at 500°C and cold forming at room temperature



Rys. 5. Wpływ składu chemicznego i temperatury badań na przebieg krzywych umocnienia, otrzymanych w próbie ściskania materiałów kutech w temperaturze 500°C oraz dodatkowo odkształczanych w temperaturze otoczenia. A, B, C, D) wyroby z aluminium, E, F, G, H) kompozyty aluminium - 5% obj. cząstek węgla krzemu. Temperatura ściskania; A, E) 20°C, B, F) 100°C, C, G) 150°C, D, H) 200°C

Fig. 5. The influence of SiC particles content and the test temperature on the flow curves obtained in axial compression after forging and cold forming at room temperature. A, B, C, D) aluminium products; E, F, G, H) Al-5%SiC composites. Compression test temperature: A, E) 20°C; B, F) 100°C; C, G) 150°C; D, H) 200°C

Twierdzenie

Pomiar twardości przeprowadzono metodą Brinella. Wyniki pomiarów twardości zestawiono na rysunku 4. Wprowadzenie do osnowy aluminiowej cząstek węgla krzemu lub zwiększenie ich udziału w objętości kompozytu powoduje wzrost twardości HB. Twardość rośnie także w wyniku odkształcenia materiału w temperaturze otoczenia oraz zwiększa się wraz ze wzrostem odkształcenia.

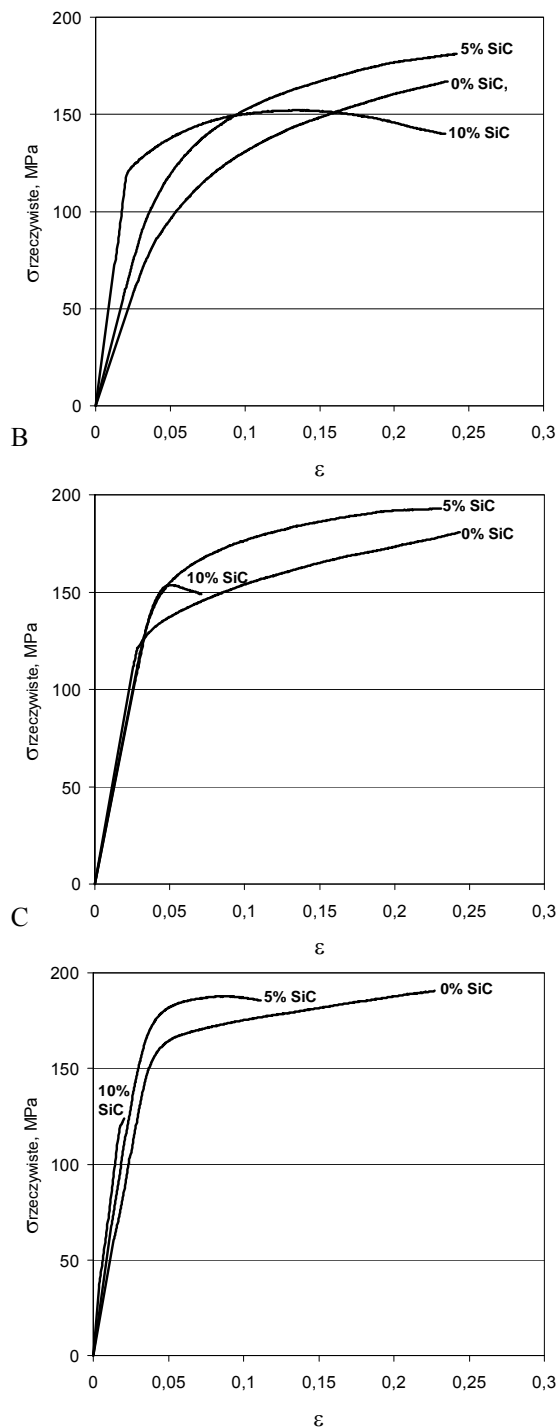
Opracowanie krzywych umocnienia

Zachowanie się tworzyw otrzymanych w procesie kucia w temperaturze 500°C oraz dodatkowo odkształcanych w temperaturze otoczenia badano podczas ich jednoosiowego ściskania w różnych temperaturach. Stosowano próbki o średnicy 8 mm i stosunku wysokości do średnicy wynoszącym 1,2. Ściskanie przeprowadzono w temperaturze otoczenia oraz w podwyższonych temperaturach, wynoszących odpowiednio 100, 150 i 200°C. Badania wykonano na stanowisku na maszynie wytrzymałościowej Instron, w przyrządzie z automatycznym sterowaniem temperaturą oraz pomiarem i rejestracją zależności siły od drogi odkształcenia. Ściskanie realizowano przy stałej prędkości, która wynosiła 0,0833 mm · s⁻¹. Rejestrację danych prowadzono z częstotliwością 25 Hz.

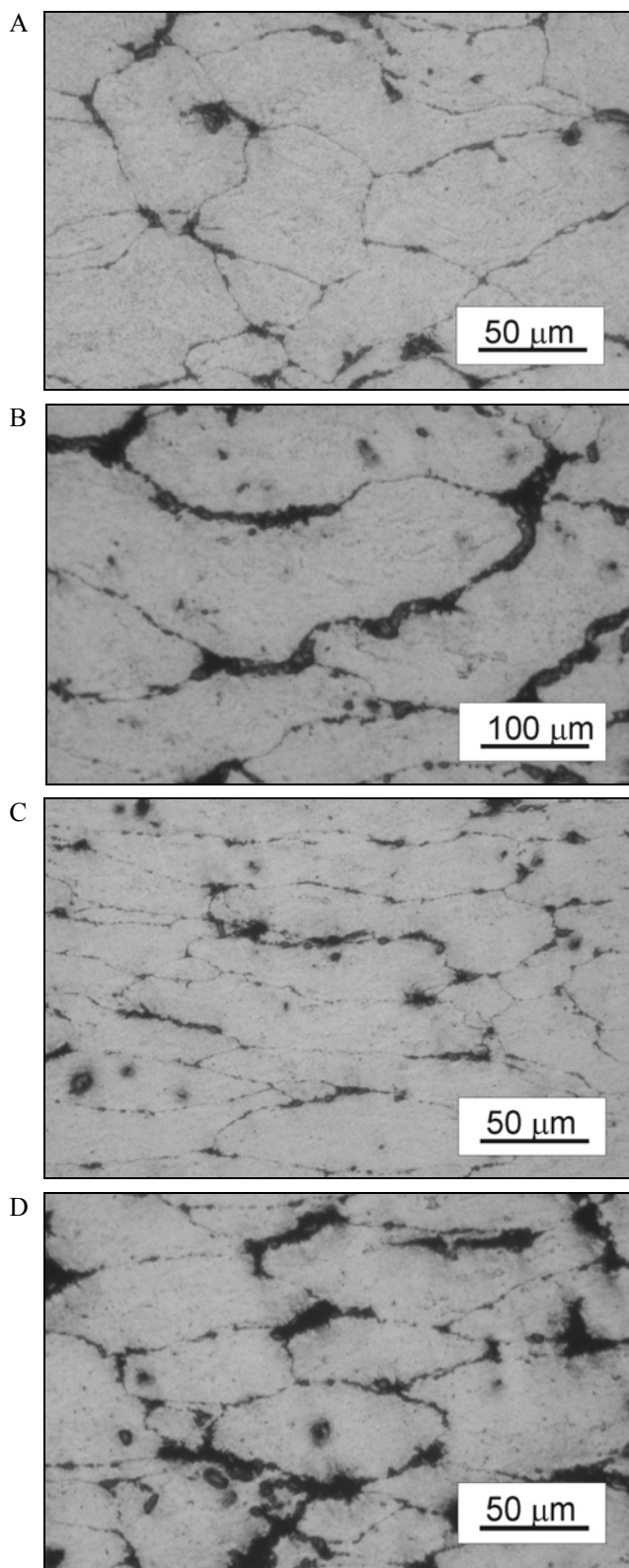
Na rysunku 5 pokazano krzywe płynięcia dla badanych tworzyw otrzymane podczas ich ściskania w przyjętych do badań temperaturach, odpowiednio dla aluminium (rys. 5A-D) oraz dla kompozytu o zawartości 5% obj. węgla krzemu (rys. 5E-H). Rysunek 6 przedstawia przykładowe zestawienia przebiegów zależności naprężenie rzeczywiste $\sigma_{rzeczywiste}$ - odkształcenie ϵ tworzyw w zależności od ich składu chemicznego, wykonane w temperaturze otoczenia dla poszczególnych gniotów zadanych po kuciu na gorąco.

Zmiany temperatury spęczania do 150°C powodują jedynie nieznaczny spadek naprężeń koniecznych do uzyskania danego odkształcenia (rys. 5A-C, 5E-G). W temperaturze 200°C istotnie obniża się naprężenie, przy którym przebiega płynięcie badanych materiałów (rys. 5D-H). Prawdopodobną przyczyną jest rekrytalizacja badanych tworzyw. Brak umocnienia jest szczególnie widoczny na krzywych ściskania materiału osnowy w temperaturze 200°C (rys. 5D). W przypadku aluminium oraz kompozytu o zawartości 5% obj. cząstek węgla krzemu odkształcenie na zimno po kuciu powoduje umocnienie materiału. Wyjątkiem jest próbka o zawartości 5% obj. cząstek węgla krzemu odkształcana po kuciu z gniotem $\epsilon_h = 25\%$ ściskana w temperaturze 200°C, gdzie przy odkształceniach powyżej 0,15 tendencja ta ulega zachwianiu (rys. 5H). Również z wyjątkiem tej próbki w wyniku wprowadzenia do aluminiowej osnowy 5% obj. cząstek węgla krzemu okre-

ślone odkształcenie zachodzi przy wyższych naprężeniach, niezależnie od temperatury próby i stopnia Kompozyt o zawartości 10% obj. cząstek węgla krzemu ulega zniszczeniu przy niższych wartościach naprężeń i odkształceń niż ma to miejsce w przypadku aluminium lub kompozytu o zawartości 5% węgla krzemu (rys. 6). Przy tym składzie chemicznym i warunkach kucia odkształcenie na zimno wpływa negatywnie na własności kompozytu.



Rys. 6. Wpływ składu chemicznego na przebieg krzywych umocnienia, otrzymanych w próbie jednoosiowego ściskania w temperaturze otoczenia materiałów kutech w temperaturze 500°C oraz dodatkowo odkształcanych na zimno z różnymi gniotami (ϵ_h): A) 0%, B) 8%, C) 25%.
 Fig. 6. The influence of SiC particles content and the test temperature on the flow curves obtained in axial compression after forging and cold forming at room temperature with various reductions of height ϵ_h : A) 0%, B) 8%, C) 25%



Rys. 7. Struktury wyrobów z proszku Al-1 i kompozytów na jego osnowie umocnionych cząstkami węgla krzemu SiC_{1000} , otrzymanych przez kucie w temperaturze 500°C oraz dodatkowo odkształczanych na zimno z różnym gniotem ε_h . Zgłady poprzeczne po trawieniu. Gniot ε_h : A, B) 0%, C, D) 25%. A, C) 5% obj. cząstek SiC , B, D) 10% obj. cząstek SiC

Fig. 7. Structures of the composites after forging at 500°C and cold forming at room temperature with various reductions of height ε_h . Cross sections after etching; Reduction of height ε_h : A, B) 0%, C, D) 25%. A, C) 5% vol. SiC particles, B, D) 10% vol. SiC particles

Badania metalograficzne

Badania metalograficzne przeprowadzono na mikroskopie świetlnym NU. Na rysunku 7 zestawiono mikrofotografie struktur otrzymanych wyrobów. Wprowadzone do osnowy cząstki węgla krzemu rozmieszczone są przede wszystkim wzdłuż granic pierwotnych cząstek proszku, sporadycznie obserwuje się je także wewnątrz cząstek. Odkształcenie na zimno po zgnioście spowodowało zniekształcenie ziaren. Widoczne na zgładach kompozytu o zawartości 5% obj. fazy umacniającej (rys. 7A, C) cząstki węgla krzemu są rozlokowane równomiernie na granicach pierwotnych cząstek proszku, a ich skupiska w osnowie są dość rzadkie. Zwiększenie zawartości węgla krzemu w osnowie do 10% obj. (rys. 7B, D) spowodowało powstawanie w tych obszarach skupisk cząstek fazy umacniającej słabo związanych z osnową, co jest szczególnie widoczne na zgładach tworzyw poddanych odkształcaniu na zimno (rys. 7D). Tłumaczy to jakościowo wyniki uzyskane dla tego materiału podczas badania gęstości oraz w próbie jednoosiowego ściskania.

WNIOSKI

Na podstawie wyników badań materiałów z proszku aluminium oraz kompozytów na jego osnowie umocnionych cząstkami węgla krzemu SiC_{1000} , otrzymanych w procesie kucia wyprasek w temperaturze 500°C oraz tych tworzyw po ich odkształcaniu na zimno z różnymi gniotami, można stwierdzić, że:

1. Proces kucia w temperaturze 500°C wyprasek z proszku aluminium oraz kompozytów na jego osnowie umocnionych cząstkami węgla krzemu pozwala na otrzymanie wyrobów o wysokich gęstościach względnych. Gęstość tworzyw obniża się wraz ze zwiększeniem udziału cząstek węgla krzemu w osnowie. Ich spęczanie w temperaturze otoczenia powoduje poprawę zagęszczenia, proporcjonalnie do wielkości zastosowanego odkształcenia.
2. Wzrost udziału objętościowego cząstek węgla krzemu w osnowie powodował zwiększenie wymaganego do odkształcenia z zadaniem gniotem nacisku jednostkowego podczas spęczania na zimno tych tworzyw.
3. Wprowadzenie do osnowy aluminiowej cząstek węgla krzemu lub zwiększenie ich udziału w objętości kompozytu powoduje wzrost twardości HB. Twardość rośnie także w wyniku odkształcenia materiału w temperaturze otoczenia oraz zwiększa się wraz ze wzrostem odkształcenia.
4. Podczas jednoosiowego ściskania tworzyw zmiany temperatury do 150°C powodują jedynie nieznaczny spadek naprężeń koniecznych do uzyskania danego odkształcenia, a w temperaturze 200°C istotnie obniża się naprężenie, przy którym przebiega płynięcie.

Dla aluminium i kompozytu o zawartości 5% obj. cząstek węgla krzemu odkształcenie na zimno po kuciu powoduje umocnienie materiału. W wyniku wprowadzenia do osnowy 5% obj. cząstek węgla krzemu naprężenie konieczne do uzyskania określonego odkształcenia rośnie, niezależnie od temperatury próby i wielkości gniotu po kuciu. Wyjątkiem jest próbka o zawartości 5% obj. cząstek węgla krzemu ściskana w temperaturze 200°C. Kompozyt o zawartości 10% obj. cząstek węgla krzemu ulega zniszczeniu przy niższych wartościach naprężeń i odkształceń niż materiał osnowy lub tworzywo kompozytowe o zawartości 5% obj. tych cząstek.

5. Obserwacje struktur otrzymanych tworzyw potwierdziły w sposób jakościowy wyniki otrzymane podczas badań gęstości oraz w próbie jednoosiowego ściskania.

LITERATURA

- [1] Gao J.W., Wang C.Y., Modeling the solidification of functionally graded materials by centrifugal casting, *Materials Science and Engineering* 2000, A292, 207-215.
- [2] Dolata-Grosz A., Śleziona J., Wieczorek J., Wytwarzanie i kształtowanie struktury kompozytowych odlewów aluminium o założonym rozmieszczeniu zbrojenia, *Kompozyty (Composites)* 2003, 3, 6, 125-130.
- [3] Tjong S.C., Ma Z.Y., High-temperature creep behaviour of powder-metallurgy aluminium composites reinforced with SiC particles of various sizes, *Composites Science and Technology* 1999, 59, 1117-1125.
- [4] Wojtaszek M., Szczepanik S., Wybrane własności kompozytu aluminium-cząstki węgla krzemu otrzymanego przez wyciskanie wyprasek z proszku, *Kompozyty (Composites)* 2003, 3, 8, 415-420.
- [5] Kaczmar J.W., Pietrzak K., Włosiński W., The production and application of metal matrix composite materials, *Journal of Materials Processing Technology* 2000, 106, 58-67.
- [6] Perończyk J., Biało D., Wpływ zawartości fazy zbrojącej Al₂O₃ i SiC w kompozytach aluminium na przebieg i wybrane wskaźniki technologiczne obróbki elektroerozyjnej (EDM), *Kompozyty (Composites)* 2003, 3, 8, 366-369.
- [7] Strainer L.G., Optimisation of the wet lay up/vacuum bag process for CRFP composites, *Composites* 1989, 20, 5, 441-149.
- [8] Morawiecki M., Sadok L., Wosiek E., Przeróbka plastyczna, Podstawy teoretyczne, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1986.
- [9] Wojtaszek M., Szczepanik S., Grzesiak J., Plastyczność materiałów otrzymanych z proszku aluminium w zakresie temperatur przeróbki plastycznej na gorąco, *Materiały Konferencyjne XXVIII Szkoły Inżynierii Materiałowej, Kraków-Szczawnica*, 3-6.10. 2000, 281-289.

Recenzent
Andrzej Olszyna