

Stefan Szczepanik<sup>1</sup>, Bartosz Wiśniewski<sup>2</sup>

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

## KUCIE W MATRYCACH ZAMKNIĘTYCH WYPRASEK W STANIE PÓLCIEKŁYM Z KOMPOZYTÓW NA OSNOWIE PROSZKU STOPU Al-Cu-Si-Mg UMOCNIONYCH CZĄSTKAMI SiC

Podano wyniki badań wytwarzania materiałów kompozytowych na osnowie stopu Al8,84%Cu6,33%Si0,65%Mg umocnionych cząstkami SiC w ilości 2 i 5% obj. poprzez odkształcanie wyprasek z udziałem fazy ciekłej. Wypraski do badań o gęstości względnej 0,60 dla kompozytu o zawartości 2% obj. SiC i 0,61 dla kompozytu o zawartości 5% obj. SiC przygotowano z mieszanek na osnowie proszku stopu aluminium otrzymanego metodą rozpylania i cząstek węgla krzemu SiC 1000. Wypraski odkształcano w matrycach zamkniętych w stanie stałym w temperaturze 500°C i z udziałem fazy ciekłej w temperaturach 510 i 530°C, uzyskując wyroby o gęstościach względnych do 0,99 dla kompozytu o zawartości 2% obj. SiC i do 0,986 dla kompozytu o zawartości 5% obj. SiC. Badania własności mechanicznych otrzymanych wyrobów z materiałów kompozytowych objęły pomiar twardości (rys. 5), wytrzymałość na zginanie (rys. 6) oraz na opracowanie krzywych umocnienia (rys. 7) w stanie po kuciu oraz po obróbce cieplnej polegającej na przesycaaniu i starzeniu (tab. 1). Na przykładzie odkuwki modelowej (rys. 9) przedstawiono możliwość zastosowania tej technologii do wytwarzania elementów konstrukcyjnych o złożonych kształtach.

**Słowa kluczowe:** kompozyty, proszek stopowy aluminiowy, faza umacniająca, faza ciekła, kucie w matrycach zamkniętych, własności mechaniczne

## CLOSED-DIE FORGING IN SEMI-SOLID-STATE OF COMPOSITES FROM PM Al-Cu-Si-Mg ALLOY REINFORCED WITH SiC PARTICLES

The paper presents the results of the research on manufacturing of composite materials based on Al8.84%Cu6.33%Si0.65%Mg and reinforced with 2 and 5 vol.% of SiC particles by forming of preforms with the liquid phase. The preforms had their relative density 0.60 for the composite with 2 vol.% of SiC and 0.61 for the composite with 5 vol.% of the SiC. They were all prepared from the mixtures based on aluminium alloy powder obtained by spraying and the particles of silicon carbide SiC1000. The preforms were close-die forged in solid state at 500°C and with the liquid phase content at 510 and 530°C. The obtained products had their relative density up to 0.99 for the composites with 2 vol.% of SiC and up to 0.986 for the compacts with 5 vol.% of SiC. The examination of the mechanical properties of the products covered hardness (Fig. 5), bending strength (Fig. 6) and stress-strain curves (Fig. 7) after forging and after forging and heat treatment which included solutioning and ageing (Tab. 1). The sample forging shows the possibilities of application of forming with liquid phase content in manufacturing constructive elements of complex shapes (Fig. 9).

**Key words:** composites, aluminium alloy based powder, reinforced phase, closed-die forging, mechanical properties

### WPROWADZENIE

Faza ciekła występuje w równowadze z fazą stałą podczas krzepnięcia stopów lub w wyniku ich nagrzania do zakresu temperatur pomiędzy temperaturą solidus a temperaturą likwidus. Odkształcanie materiału w tych warunkach może być realizowane przy zastosowaniu małych nacisków jednostkowych, a obecna w strukturze faza ciekła ułatwia wypełnianie wykroju matrycy podczas procesu kształtowania. Procesy odkształcania z udziałem fazy ciekłej są zaawansowane zarówno pod względem technicznym, jak i technologicznym dla stopów otrzymanych w procesach metalurgicznych [1, 2].

Istnieje również możliwość zastosowania tego procesu do odkształcania wyprasek ze stopów otrzymanych me-

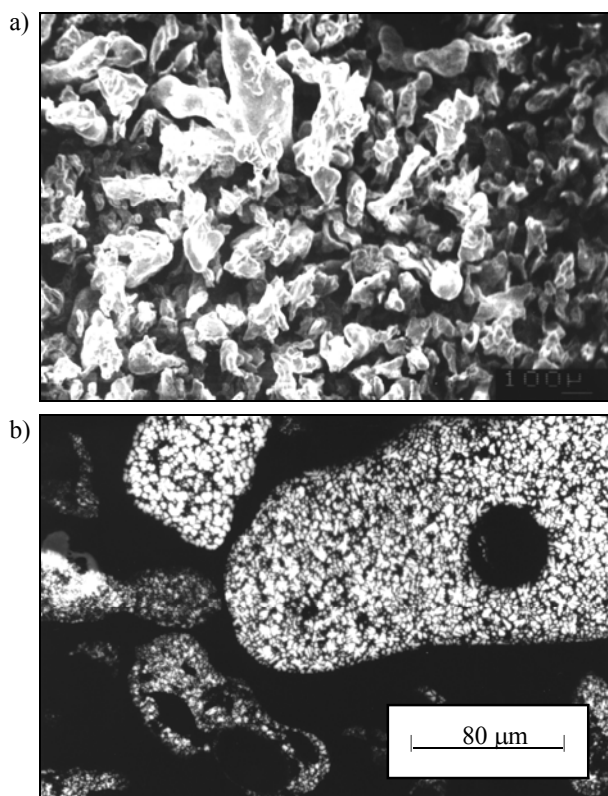
todą metalurgii proszków i kompozytów na ich osnowie [3-5]. Głównymi zagadnieniami w odniesieniu do tej grupy materiałów są:

- możliwe do uzyskania własności wyrobów po odkształcaniu z udziałem fazy ciekłej,
- warunki płynięcia, dla których wypełnienie wykroju nastąpi w jednym zabiegu.

Wpływu temperatury i czasu wygrzewania na strukturę wyprasek z proszku Al8,84%Cu6,33%Si0,65%Mg, otrzymanego przez rozpylenie ciekłego stopu, przedstawiono w pracy [6]. Kształt cząstek i strukturę proszku tego stopu zaprezentowano na rysunku 1. Cząstki proszku mają kształt nieregularny i są zróżnicowane pod względem wielkości (rys. 1a). Struktura cząstek proszku jest drobnoziarnista z widocznymi pojedynczymi pora-

<sup>1</sup> prof. dr hab. inż., <sup>2</sup> mgr inż.

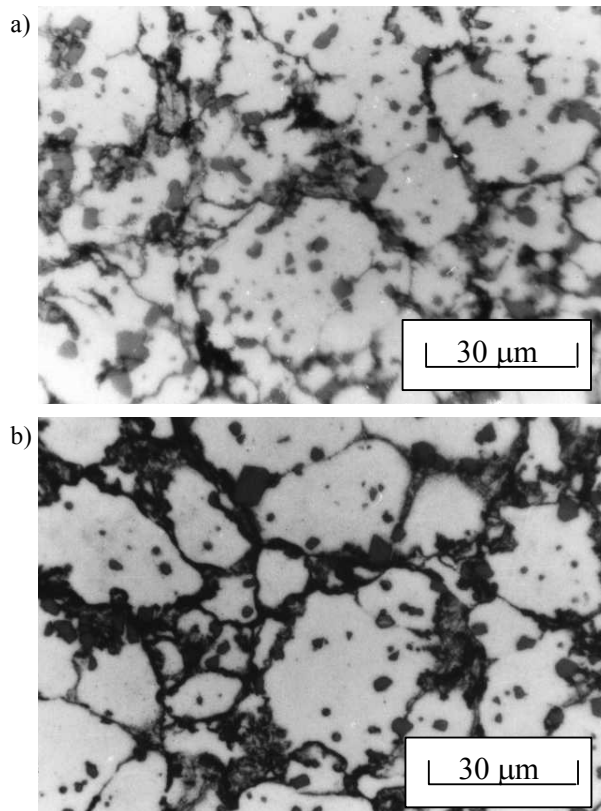
mi (rys. 1b). Jakościowe zmiany w strukturze wyprasek z proszku tego stopu analizowano pośrednio, w temperaturze otoczenia, dla materiału wygrzewanego w temperaturze 510 i 530°C w czasie 30 min, a następnie oziębionego w wodzie. Udział fazy ciekłej w stopie otrzymanym po tych zabiegach określono metodą punktową przy przyjęciu względnego błędu 10%. Charakterystyczne mikrostruktury materiału po tych zabiegach pokazano na rysunku 2. W wygrzewanych w temperaturze 510°C przez 30 min wypraskach z proszku stopu Al8,84%Cu6,33%Si0,65%Mg udział fazy ciekłej wynosi 22,9% obj., a wygrzewanych w temperaturze 530°C w tym samym czasie 35,7% obj.



Rys. 1. Morfologia i mikrostruktura cząstek proszku stopu Al8,84%Cu6,33%Si0,65%Mg

Fig. 1. Morphology of the particles and the microstructure of Al8,84%Cu6,33%Si0,65%Mg powder

W pracy [7] analizowano zmiany w strukturze i własności wyrobów otrzymanych z proszku stopu aluminium Al8,84%Cu6,33%Si0,65%Mg w zależności od temperatury kucia w matrycach zamkniętych oraz ich obróbki cieplnej. Niniejsza praca jest kontynuacją badania procesów kucia w stanie półciekłym półwyrobów otrzymanych z proszków. Opracowane w pracy [7] warunki kucia w matrycach zamkniętych wyprasek ze stopu Al8,84%Cu6,33%Si0,65%Mg zastosowano do odkształcania materiałów kompozytowych na osnowie proszku tego stopu zawierających 2 lub 5% obj. cząstek węgla krzemu. Podano także przykład otrzymania wyrobu modelowego z zastosowaniem tej technologii kucia.



Rys. 2. Struktura wypraski z proszku stopu Al8,84%Cu6,33%Si0,65%Mg po nagraniu: a) do temperatury 510°C, wytrzymaniu przy tej temperaturze 30 min oraz oziębieniu w wodzie, b) do temperatury 530°C, wytrzymaniu przy tej temperaturze 15 min oraz oziębieniu w wodzie

Fig. 2. The structure of the PM preform from Al8,84%Cu6,33%Si0,65%Mg after: a) heating to 510°C in 30 min and cooling in water, b) after heating to 530°C in 15 min and cooling in water

## BADANIA WPLYWU WARUNKÓW KUCIA WYPRASEK NA WŁASNOŚCI KOMPOZYTÓW

Celem badań jest określenie wpływu odkształcania z udziałem fazy ciekłej kompozytów na osnowie stopu Al8,84%Cu6,33%Si0,65%Mg (AM75) umocnionego cząstkami SiC w ilości 2 lub 5% obj. na własności wyrobów. Udziały poszczególnych frakcji proszku stopu aluminium wynosiły: poniżej 40 μm 21,82%, w przedziałach 50÷140 μm - 41,81%, 90÷140 μm - 20,07%, 140÷400 μm - 16,3%. Do badań zastosowano wypraski o średniej gęstości 1,74 g/cm<sup>3</sup> dla kompozytu zawierającego 2% obj. cząstek SiC oraz 1,75 g/cm<sup>3</sup> dla kompozytów zawierających 5% obj. cząstek SiC.

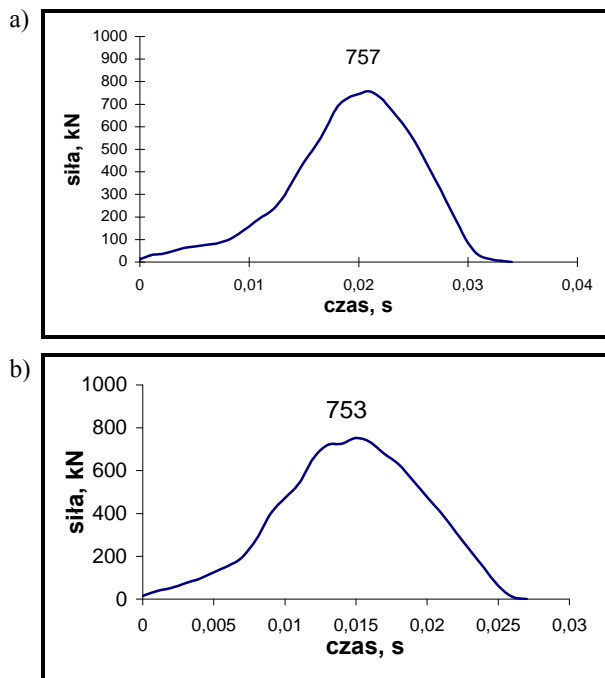
Odształcanie wyprasek z proszków realizowano w matrycy zamkniętej w jednym zabiegu na prasie śrubowej. Matryce podgrzewano do temperatury 300°C. Wypraski nagrzewano do zadanej temperatury przez 20 min i wytrzymywano w niej 30 min. Kucie przeprowadzono w temperaturze 500°C, tj. poniżej temperatury solidus

i powyżej tej temperatury w 510 lub 530°C. Średnia wartość odkształcenia wyprasek wynosiła  $\varepsilon = 54\%$ .

Po kuciu stosowano dwa sposoby chłodzenia: chłodzenie na powietrzu lub oziębianie w wodzie. Badano własności otrzymanych materiałów w stanie po kuciu i po obróbce cieplnej polegającej na przesycaaniu w temperaturze 500°C w czasie 2 h i starzeniu w temperaturze 200°C przez 4,5 lub 6 h. Własności materiałów po kuciu oraz po obróbce cieplnej określono w próbie zginania, próbie spęczniania w temperaturze 20°C oraz przez pomiar twardości.

### Wyniki badań własności odkuwek z materiałów kompozytowych

**Gęstość materiałów kompozytowych.** Gęstość wyrobów określono metodą Archimedesza przez określenie masy w powietrzu i wodzie. W wyniku kucia w zadanych warunkach uzyskano materiały o dużych gęstościach. I tak średnia gęstość względna odkuwek z materiału kompozytowego o zawartości 2% obj. SiC otrzymanych przez kucie w temperaturze 500°C wynosi 0,996 (2,82 g/cm<sup>3</sup>), przez kucie w temperaturze 510°C - 0,983 (2,81 g/cm<sup>3</sup>), a przez kucie w temperaturze 530°C - 0,990 (2,83 g/cm<sup>3</sup>). Przykładowe zmiany siły w czasie kucia wyprasek z kompozytu zawierającego 2% obj. SiC przedstawiono na rysunku 3.

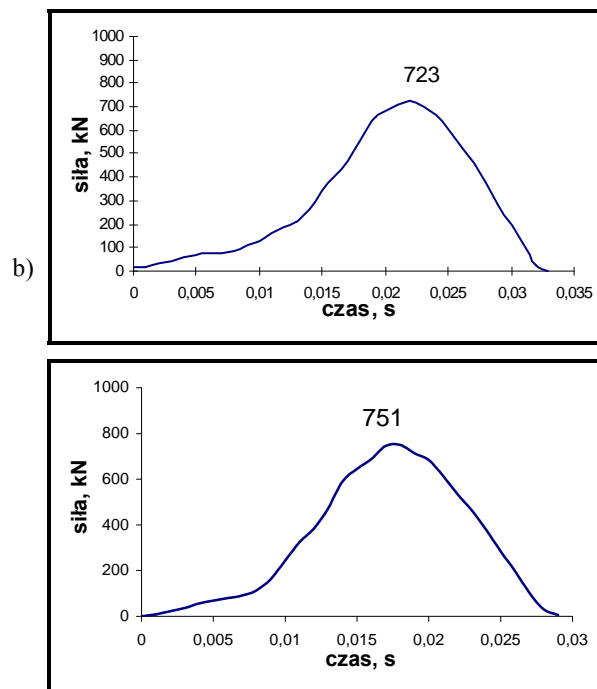


Rys. 3. Zmiany siły podczas kucia wyprasek Al<sub>8,84%</sub>Cu<sub>6,33%</sub>Si<sub>0,65%</sub>Mg + 2% obj. SiC w temperaturze: a) 510°C, b) 530°C

Fig. 3. Force vs time during forging of Al<sub>8.84%</sub>Cu<sub>6.33%</sub>Si<sub>0.65%</sub>Mg + 2 vol.% SiC at: a) 510°C, b) 530°C

Średnia gęstość względna odkuwek z materiału kompozytowego o zawartości 5% obj. SiC odkutych w tempe-

raturze 500°C wynosi 0,979 (2,81 g/cm<sup>3</sup>), w temperaturze 510°C wynosi 0,983 (2,82 g/cm<sup>3</sup>), a w temperaturze 530°C - 0,986 (2,83 g/cm<sup>3</sup>). Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe zmiany siły w czasie kucia wyprasek tego kompozytu.



Rys. 4. Zmiany siły podczas kucia wyprasek Al<sub>8,84%</sub>Cu<sub>6,33%</sub>Si<sub>0,65%</sub>Mg + 5% obj. SiC w temperaturze: a) 510°C, b) 530°C

Fig. 4. Force vs time during forging of Al<sub>8.84%</sub>Cu<sub>6.33%</sub>Si<sub>0.65%</sub>Mg + 5 vol.% SiC at: a) 510°C, b) 530°C

Gęstości wyrobów otrzymanych w wyniku kucia są zbliżone do gęstości teoretycznej. Podczas odkształcania wyprasek w temperaturze 530°C wystąpiły problemy z ich odkształcaniem w stanie półciekłym. Prawdopodobnie spowodowane one były utratą spójności materiału zawierającego fazę ciekłą podczas kucia na prasie śrubowej, której charakter pracy jest dynamiczny.

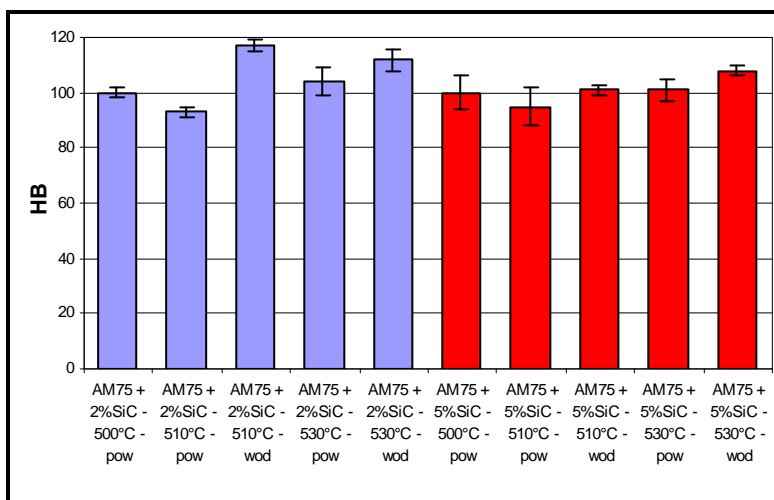
**Własności mechaniczne materiałów kompozytowych.** Własności materiałów kompozytowych po kuciu określono przez pomiar twardości Brinella, wytrzymałości na zginanie oraz na ściskanie. Błąd pomiaru wyznaczono z rozkładu *t* Studenta dla  $\alpha = 0,05$ . Twardości materiałów w stanie po kuciu w zależności od warunków chłodzenia przedstawiono na rysunku 5, a wytrzymałość na zginanie na rysunku 6.

Widoczny jest silny wpływ temperatury odkształcania i szybkości chłodzenia po kuciu na badane własności materiałów kompozytowych.

Zależności naprężenie-odkształcenie określone w próbie ściskania dla otrzymanych materiałów kompozytowych po kuciu w temperaturze 500°C i chłodzeniu w powietrzu zaprezentowano na rysunku 7. W tabeli 1 przedstawiono własności materiałów kompozytowych po przesycaaniu (500°C/2,5 h/woda) i starzeniu (200°C/4,5

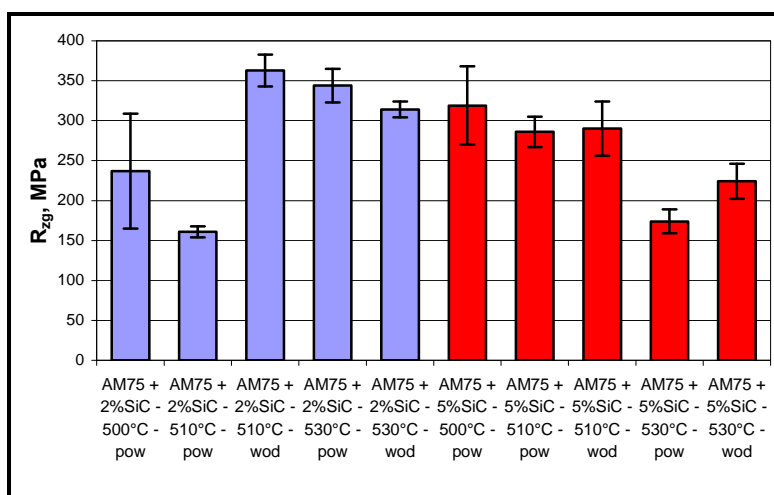
---

z uwzględnieniem innych zabiegów technologicznych.  $\alpha = 0,05$ . Wyniki obejmują twardość i wytrzymałość na  
Błąd pomiaru wyznaczono z rozkładu t Studenta dla zginanie.



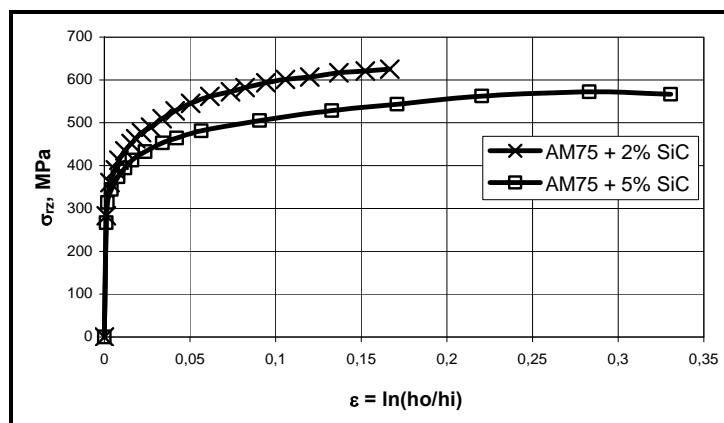
Rys. 5. Twardości materiałów kompozytowych na osnowie proszku Al<sub>8.84%</sub>Cu<sub>6.33%</sub>Si<sub>0.65%</sub>Mg (oznaczenie AM75) zawierających 2 lub 5% obj. SiC w zależności od temperatury odkształcania podczas kucia i warunków chłodzenia po odkształcaniu (pow - na powietrzu, wod - oziębienie w wodzie)

Fig. 5. Hardness of composites based on Al<sub>8.84%</sub>Cu<sub>6.33%</sub>Si<sub>0.65%</sub>Mg (AM75) with 2 or 5 vol.% SiC particles content, in dependence of forging temperature and cooling conditions after forming (pow = in air, wod = in water)



Rys. 6. Wytrzymałość na zginanie materiałów kompozytowych na osnowie proszku Al<sub>8.84%</sub>Cu<sub>6.33%</sub>Si<sub>0.65%</sub>Mg (oznaczenie AM75) zawierających 2 lub 5% obj. SiC w zależności od temperatury odkształcania podczas kucia i warunków chłodzenia po odkształcaniu (pow - na powietrzu, wod - oziębienie w wodzie)

Fig. 6. Bending strength of composites based on Al<sub>8.84%</sub>Cu<sub>6.33%</sub>Si<sub>0.65%</sub>Mg (AM75) with 2 or 5 vol.% SiC particles content, in dependence of forging temperature and cooling conditions after forming (pow = in air, wod = in water)



Rys. 7. Zależność naprężenie-odkształcenie określone w temperaturze 20°C dla materiałów kompozytowych na osnowie proszku Al<sub>8.84%</sub>Cu<sub>6.33%</sub>Si<sub>0.65%</sub>Mg (AM75) zawierających 2 lub 5% obj. SiC otrzymanych w wyniku kucia w temperaturze 500°C i chłodzenia w powietrzu

Fig. 7. Stress-strain curve at 20°C for composites based on Al<sub>8.84%</sub>Cu<sub>6.33%</sub>Si<sub>0.65%</sub>Mg (AM75) with 2 or 5 vol.% SiC particles content, obtained by forging at 500°C and cooling in air

TABELA 1. Własności kompozytów po kuciu i obróbce cieplnej  
TABLE 1. Properties of composites after forging and heat treatment

Materiał	Temperatura kucia, °C	Sposób chłodzenia po kuciu	Twardość HB	Wytrzymałość na zginanie $R_{zg}$ , MPa	Po przesycaaniu i starzeniu	
					Twardość HB	Wytrzymałość na zginanie $R_{zg}$ , MPa
AM75+2% obj. SiC	500	powietrze	100 ±2	237 ±29	115 ±2	617 ±300
	510	powietrze	93 ±2	161 ±7		
		woda	117 ±2	363 ±20		
	530	powietrze	104 ±5	344 ±21	117 ±2	339 ±9
woda		112 ±4	314 ±10	113 ±3	262 ±37	
AM75+5% obj. SiC	500	powietrze	100 ±6	319 ±49	119 ±4	687 ±47
	510	powietrze	95 ±7	286 ±19		
		woda	101 ±2	290 ±34		
	530	powietrze	101 ±4	174 ±15	119 ±2	251 ±22
woda		108 ±2	224 ±22	122 ±2	243 ±16	

Wyniki te pokazują wpływ parametrów technologicznych na wybrane własności materiałów kompozytowych odkształczanych z udziałem fazy ciekłej. Własności te są niższe w stosunku do własności dla materiałów odkształczanych w temperaturze 500°C, tj. poniżej temperatury solidus.

### PRZYKŁAD MOŻLIWOŚCI WYTWARZANIA ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH W PROCESIE KUCIA MATRYCOWEGO

Możliwości otrzymania elementów konstrukcyjnych w wyniku odkształcania z udziałem fazy sprawdzono w oparciu o kucie modelowej odkuwki, posiadającej przemiennie zęby o różnych wymiarach. Na rysunku 8 pokazano wyniki kucia w matrycach zamkniętych dla materiału modelowego plasteliny, a na rysunku 9 dla stopu aluminium w postaci odlewu i wypraski. Poszczególne etapy procesu wypełniania wykroju podczas odkształcania z udziałem fazy ciekłej wypraski ze stopu Al8,84%Cu6,33%Si0,65%Mg widoczne są na zależności siły od drogi odkształcenia (rys. 10). Etap I obejmuje zagęszczanie wypraski. W drugim etapie materiał wpływa w wykroje zębów w matrycy przy wzrastającej sile. W końcowym etapie następuje wypełnienie wykroju przy bardzo małym przemieszczeniu stempla i dużym przyroście siły.



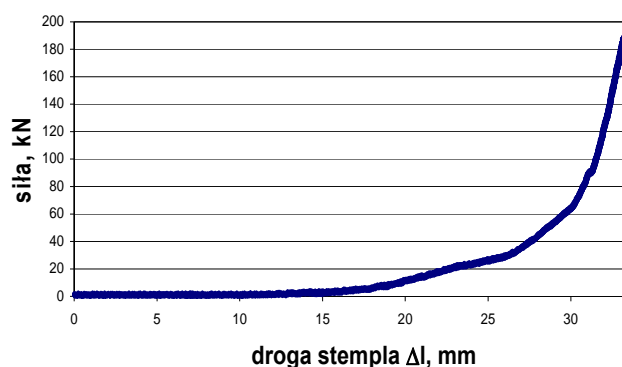
Rys. 8. Odkuwka modelowa wykonana z plasteliny: a) wsad, b) odkuwka

Fig. 8. Sample forging from plasticine: a) charge, b) forging



Rys. 9. Odkuwka wykonana ze stopu aluminium Al8,84%Cu6,33%Si0,65%Mg w wyniku odkształcania z udziałem fazy ciekłej: a) odlewu, b) wypraski z kompozytu otrzymanego z proszku

Fig. 9. Forgings obtained from Al8.84%Cu6.33%Si0.65%Mg alloy: a) a cast, b) powder composite



Rys. 10. Zależność siły od wielkości odkształcenia podczas kucia wypraski z kompozytu na osnowie stopu Al8,84%Cu6,33%Si0,65%Mg z udziałem fazy ciekłej

Fig. 10. Force vs deformation during forging of the composite preform based on Al8.84%Cu6.33%Si0.65%Mg matrix with liquid phase content

Przedstawione wyniki kucia pokazują techniczną możliwość wykonania w kraju odkuwek w matrycach zamkniętych podczas odkształcania z udziałem fazy ciekłej wyprasek otrzymanych z proszków i kompozytów na ich osnowie lub wsadu odlewanego.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone badania pozwoliły na jakościową analizę zmian własności wyprasek z materiałów kompozytowych na osnowie proszku stopu Al8,84%Cu 6,33%Si0,65%Mg z udziałem cząstek węgla krzemu w zależności od temperatury kucia w matrycy zamkniętej na wybrane własności i strukturę wyrobów.

Materiał wyjściowy otrzymany ze stopu metodą metalurgii proszków cechuje się drobnoziarnistą strukturą. Podczas wygrzewania wyprasek w temperaturze 510 i 530°C tworzy się w stopie struktura z wydzieleniami mieszaniny eutektycznej po granicach fazy stałej. Kucie wyprasek z materiału kompozytowego na osnowie proszku stopu aluminium z występującą fazą ciekłą w jego osnowie powoduje otrzymanie tworzywa zagęszczonego, o własnościach zależnych od temperatury odkształcania oraz zastosowanej obróbki cieplnej.

W wyniku kucia w matrycach zamkniętych badanych materiałów kompozytowych z udziałem fazy ciekłej jest możliwe otrzymanie wyrobów o skomplikowanym kształcie w jednym zabiegu. Celowe jest prowadzenie dalszych badań dla opracowania warunków wypełniania wykroju matrycy podczas odkształcania stopów z występującą fazą ciekłą.

*Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2002-2005 jako projekt badawczy KBN 4 T08D 007 23.*

## LITERATURA

- [1] Bremer T., Martens H.-P., Kopp R., Thixoschmieden, Umformtechnik mit Kreativität zu innovativen Lösungen, Aachener Stahlkolloquium, Aachen, 23-24 März 1995.
- [2] Kopp R., Müller T., Neudenberger D., Winning G., Thixoforging and Thixoextrusion - Benefits of Innovative Forming Technologies, Proceedings 6<sup>th</sup> International Conference on Technology of Plasticity, Advanced Technology of Plasticity 1999, 3, 1677.
- [3] Li Z., Fearis W., North H., Particulate segregation and mechanical properties in transient liquid phase bonded metal matrix composite material, Materials Science and Technology 1995, 11, 363.
- [4] Askew J.R., Wilde J.F., Khan T.I., Transient liquid phase bonding of 2124 aluminium metal matrix composite, Materials Science and Technology 1998, 14, 920.
- [5] Moreno M.F., Urretavizcaya G., Gonzalez Oliver C.J.R., Hot pressing densification of Al (Al-Cu) short Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fibres mixtures, Powder Metallurgy 2000, 43, 1, 83.
- [6] Szczepanik S., Frydrych J., Krawiarz J., Wiśniewski B., Kucie w matrycach zamkniętych wyprasek z proszku stopu Al-Cu-Si z udziałem fazy ciekłej, Rudy i Metale Nieżelazne 2003, 48, 10-11, 473.
- [7] Szczepanik S., Krawiarz J., Frydrych J., Influence of the Initial State and Heating Conditions of the Al-Cu-Si Alloy on the Evolution of the Thixotropic Structure, Inżynieria Materiałowa 2004, XXV, 3, 550.

Recenzent  
Andrzej Olszyna