

Katarzyna N. Braszczyńska-Malik¹, Przemysław Chmielowiec²
 Politechnika Częstochowska, Instytut Inżynierii Materiałowej, al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa

ZACHOWANIE SIĘ KOMPOZYTÓW MgZn6-SiC_p W PRÓBIE ŚCISKANIA

Przedstawiono wyniki badań własności mechanicznych kompozytów poddanych próbie jednoosiowego ściskania. Osnowę kompozytów stanowił stop Mg - 6% wag. Zn. Badane kompozyty były umacniane zmiennym udziałem wagowym cząstek węgla krzemu, wynoszącym 10, 20 i 30% wag. Kompozyty wytworzono prostą i niedrogą metodą odlewniczą, polegającą na mechanicznym mieszanii ciekłego metalu z wprowadzonymi cząstkami w atmosferze ochronnej. Otrzymane kompozyty charakteryzowały się jednorodnym rozmieszczeniem fazy umacniającej w objętości osnowy. Ponadto, komponenty nie wykazywały tworzenia warstw reakcyjnych na granicy cząstka/osnowa. Osnowa kompozytów składała się z roztworu stałego cynku w magnezie (faza α) oraz eutektyki $\alpha+\beta$ utworzonej w przestrzeniach międzydendrytycznych.

Wartość umownej granicy plastyczności kompozytu zawierającego 10% wag. cząstek SiC wyniosła 110 MPa. Wytrzymałość na ściskanie kompozytu była natomiast równa 344 MPa. Wzrastający dodatek cząstek fazy umacniającej kompozyt powodował obniżenie wartości odkształcenia plastycznego przeniesionego przez materiał (rys. 2) w próbie ściskania. Rosnący udział wagowy cząstek SiC spowodował również wzrost wskaźników mechanicznych kompozytu. Zarówno umowna granica plastyczności, jak i wytrzymałość na ściskanie kompozytów wzrastały (rys. 3) wraz z rosnącym udziałem fazy wzmacniającej. W pracy zamieszczono także wyniki analiz przebiegu ścieżek pęknięcia, powstałych w wyniku działania maksymalnych naprężeń ścinających (rys. rys. 4 i 5). Pęknięcia powstające w badanym materiale kompozytowym rozprzestrzeniały się po fazach stopu osnowy bez udziału granic rozdziału cząstka/osnowa, co świadczy o silnym połączeniu osnowy i fazy wzmacniającej kompozyt. W czasie badań nie obserwowano pęknięć rozprzestrzeniających się od cząstek SiC do osnowy czy przebiegających po granicach rozdziału pomiędzy cząstkami a osnową kompozytu.

Słowa kluczowe: kompozyty na osnowie metalowej, cząstki ceramiczne, próba ściskania

BEHAVIOUR OF MgZn6-SiC_p COMPOSITES DURING COMPRESSION TEST

The results of mechanical testing of magnesium matrix composites under compression have been presented. The Mg - 6 wt.% Zn alloy was used as a composite matrix. The investigated composites were reinforced with different amount of silicon carbide particles, namely 10, 20 and 30 wt.% of SiC_p. A simple and non-expensive casting method involving mechanical mixing of liquid metal and the introduced particles under the protective atmosphere was used to obtain the investigated materials. The resulted composites were characterized by uniform distribution of silicon carbide particles within the matrix alloy. Moreover, the components did not reveal creation of a reaction layers at the matrix/particles interfaces (Fig. 1). The matrix alloy was composed of a solid solution of zinc in magnesium (α phase) and a eutectic of $\alpha+\beta$ phases located in interdendritic spaces.

The yield strength value of composite reinforced with 10 wt.% of SiC particles was 110 MPa. The ultimate compressive strength of the composite was equaled to 344 MPa, what was shown in Figure 2. Increase the weight fraction of the reinforced phase caused a decrease in the plastic strain carried by the composites. However, it increased the values of the mechanical parameters measured during compression tests. Both of the parameters (the proof stress and the ultimate compressive strength) increased with the weight fraction of SiC particles (Fig. 3). In this paper the results of examination of the cracking path of the composites have been also described. The main cracking path followed the direction of the maximum shearing stress (Figs 4 and 5). The cracks in the tested composites, that arose during compression, propagated in the magnesium alloy matrix avoiding the interfaces between the SiC particles and matrix. This proves the strong connection between the metal matrix and the reinforcing phase. The performed analyses of the composite microstructure after compression tests did not reveal any cracks propagation at the matrix/particles interfaces or from the SiC particles to matrix.

Key words: metal matrix composites, ceramic particles, compression test

WPROWADZENIE

Stopy magnezu są jednym z głównych tworzyw stannowiących osnowę kompozytów metalowych. Konkurencyjność tych materiałów spowodowana jest głównie cechami magnezu, do których można zaliczyć [1-6]: możliwość długotrwałej eksploatacji złóż (ósmy pierwiastek pod względem występowania w przyrodzie), niską gęstość (2/3 gęstości aluminium), odporność na

szoki cieplne, dobre właściwości tłumienia wibracji względnych (odniesionych do gęstości), odporność na działanie roztworów silnie alkalicznych (w odróżnieniu do aluminium), dobrą lejność oraz dobrą spawalność w kontrolowanych atmosferach, dużą oszczędność energii podczas wytwarzania w stosunku do innych metali, jak również mniejsze zużycie narzędzi oraz dobrą stabilność

^{1,2} dr inż.

wymiarów. Kompozyty na osnowie magnezu i jego stopów umacniane są m.in. węglikiem krzemu. Rosnące gwałtownie w ostatnim okresie zainteresowanie osnową magnezową kompozytów można tłumaczyć jej następującymi cechami [6-12]: łatwością zwilżania niemetalowych cząstek stałych przez ciekłą osnowę, wysoką stabilnością termodynamiczną cząstek SiC w ciekłym stopie osnowy, możliwością wprowadzania praktycznie dowolnych ilości cząstek ceramicznych, wyeliminowaniem kosztownych i złożonych zabiegów wstępnej preparacji cząstek, wyeliminowaniem zabiegów modyfikacji ciekłego metalu w celu ułatwienia zwilżania, niską temperaturą i stosunkowo krótkim czasem przygotowywania suspensji kompozytowej oraz korzystnym wpływem cząstek SiC jednocześnie na własności mechaniczne, jak i trybologiczne materiału kompozytowego [13-20]. Podczas projektowania kompozytów cechą charakterystyczną i niezwykle pożądaną jest wyjątkowo dobra zwilżalność SiC przez ciekłe stopy magnezu oraz możliwość uzyskania trwałych połączeń między osnową a węglikiem krzemu o charakterze adhezyjnym [15-22] (wyjątek stanowią tutaj stopy zawierające pierwiastki ziem rzadkich, wywołujące reakcje na granicach rozdziału komponentów [15, 16]).

W większości prac badawczych poświęconych tym materiałom kompozytowym istota badań właściwości mechanicznych sprowadzona jest do próby rozciągania. Zachowanie się tych złożonych materiałów w odmiennych warunkach naprężeń może być jednak inne. Dlatego też w pracy przeprowadzono analizy zachowania się kompozytów na osnowie stopu MgZn6 w próbie ściskania. Badania przy takim rodzaju przyłożenia siły mogą mieć w konsekwencji znaczenie również w szerszych analizach właściwości trybologicznych, kiedy materiał poddawany jest znacznym obciążeniom ściskającym.

METODYKA BADAWCZA

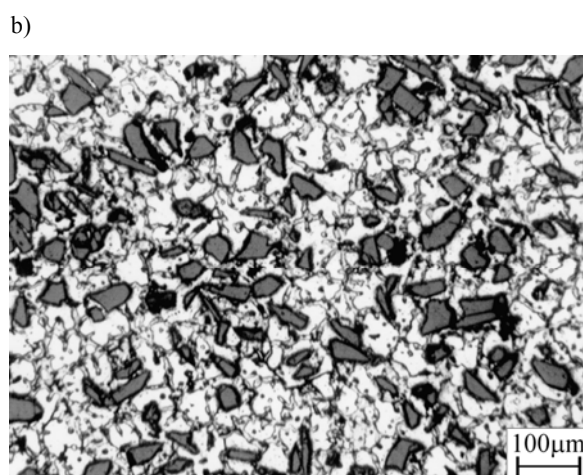
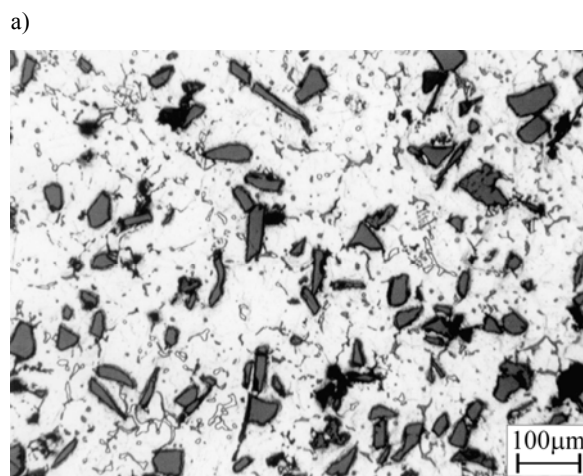
Materiał osnowy stanowił stop magnezu zawierający 6% wag. Zn. Jako fazy umacniającej użyto cząstek węgla krzemu o wielkości ziarna 40 μm . Materiał badawczy wytworzono metodą mechanicznego mieszania i odlewania grawitacyjnego do kokili, opisaną w pracach [16-22]. Kompozyty wytworzono ze zmiennym udziałem wagowym cząstek węgla krzemu: 10, 20 i 30% wag.

Próbki do badań wycięto w postaci walców o średnicy 8 mm i wysokości 12 mm. Testy jednoosiowego ściskania przeprowadzono na serwohydraulicznej maszynie wytrzymałościowej MTS. Maszyna wytrzymałościowa wyposażona była w cyfrowy kontroler sterowania typu FlexTest SE firmy MTS. Pozwoliło to na pełną cyfrową kontrolę nad przebiegiem ściskania i rejestracją uzyskanych wyników. Obciążanie próbek realizowano w funkcji sterowania tłokiem maszyny wytrzymałościowej.

Prędkość przemieszczenia tłoka maszyny wynosiła 0,02 mm/s. W czasie próby rejestrowano do pliku sygnały przesunięcia tłoka maszyny i siły obciążającej. Sygnały te, przy znajomości parametrów geometrycznych próbek, przetransponowano do postaci odkształcenie-naprężenie. Obciążenie realizowano aż do pęknięcia próbki, czego przejawem był spadek siły obciążającej. Próbki po teście ściskania przecięto, a następnie wyszlifowano na papierze ściernym w celu uzyskania powierzchni prostopadłych do widocznego makroskopowo pęknięcia głównego. Obserwacje ścieżek pęknięcia prowadzono na zglądach trawionych metalograficznych.

WYNIKI BADAŃ I DISKUSJA

Materiał badawczy charakteryzował się równomiernym rozłożeniem cząstek ceramicznych w stopie osnowy, składającym się z fazy α (roztworu stałego cynku w magnezie) oraz eutektyki $\alpha+\beta$ utworzonej w przestrzeniach dendrytycznych (β - związek międzymetaliczny typu Mg_xZn_y). Mikrostrukturę wytworzonych kompozytów zawierających przykładowo 10 i 30% wag. cząstek węgla krzemu przedstawiono na rysunku 1.

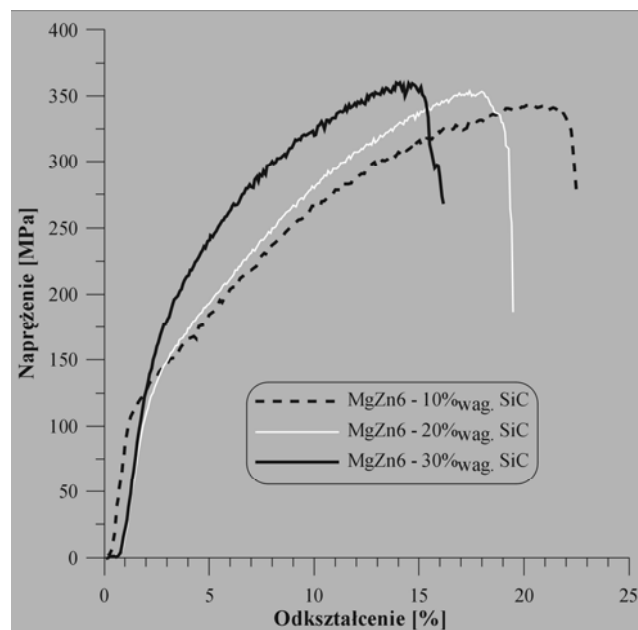


Rys. 1. Mikrostruktury kompozytów na osnowie stopu MgZn6 z cząstkami SiC: a) 10% wag., b) 30% wag.

Fig. 1. Microstructure of the MgZn6 matrix alloy composites with SiC particles: a) 10 wt.%, b) 30 wt.%

Wadami materiału kompozytowego powstałymi w procesie wytwarzania były lokalne zażużlenia, obecność fazy Mg₂Si w postaci chińskiego pisma oraz niewielki stopień porowatości [22].

Rzeczywiste krzywe odkształcenie-naprężenie uzyskane w próbie jednoosiowego ściskania kompozytów zawierających 10, 20 i 30% wag. cząstek węgla krzemu zamieszczono na rysunku 2. Jak obrazują przedstawione krzywe, kompozyty charakteryzowały się wyraźnym zmniejszeniem odkształcenia plastycznego oraz niewielkim wzrostem wytrzymałości na ściskanie wraz ze wzrostem udziału wagowego cząstek węgla krzemu. Wyznaczone w przeprowadzonej próbie na ściskanie wartości granicy plastyczności przedstawiono na rysunku 3 wraz z wartościami wytrzymałości na ściskanie w funkcji udziału wagowego cząstek SiC. Cechą charakterystyczną jest uzyskanie średnio trzykrotnie większych wartości wytrzymałości na ściskanie niż wytrzymałości na rozciąganie badanych materiałów kompozytowych [19-24].

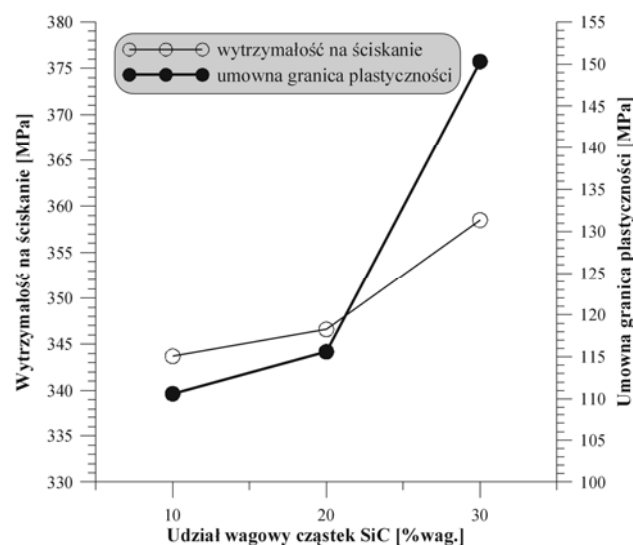


Rys. 2. Rzeczywiste krzywe odkształcenie-naprężenie stopu osnowy MgZn6 oraz kompozytów zawierających różny udział wagowy cząstek SiC

Fig. 2. True strain-stress curves of MgZ6 matrix alloy and composites containing different SiC particles weight fraction

Kształt krzywych zamieszczonych na rysunku 3 odpowiada również teoretycznej krzywej opisującej właściwości materiałów kompozytowych, wyznaczonej z równania Maxwella i przedstawionej w pracach [18, 20].

W próbie jednoosiowego ściskania pęknięcie główne przebiegało ponadto pod kątem 45° do kierunku działania obciążenia, a więc zgodnie z kierunkiem maksymalnych naprężeń ścinających. W próbach jednoosiowego rozciągania uzyskiwano natomiast przelomy usytuowane zazwyczaj po kątem 90° do kierunku działania siły [21]. Przykładowy przebieg pęknięcia głównego utworzonego w próbie ściskania kompozytu zawierającego 30% wag. cząstek SiC wraz ze schematem jego usytuowania w próbce pokazano na rysunku 4. Pęknięcia wtórne natomiast były stosunkowo krótkie i rozmieszczone niejednorodnie wzdłuż ścieżki pęknięcia głównego.

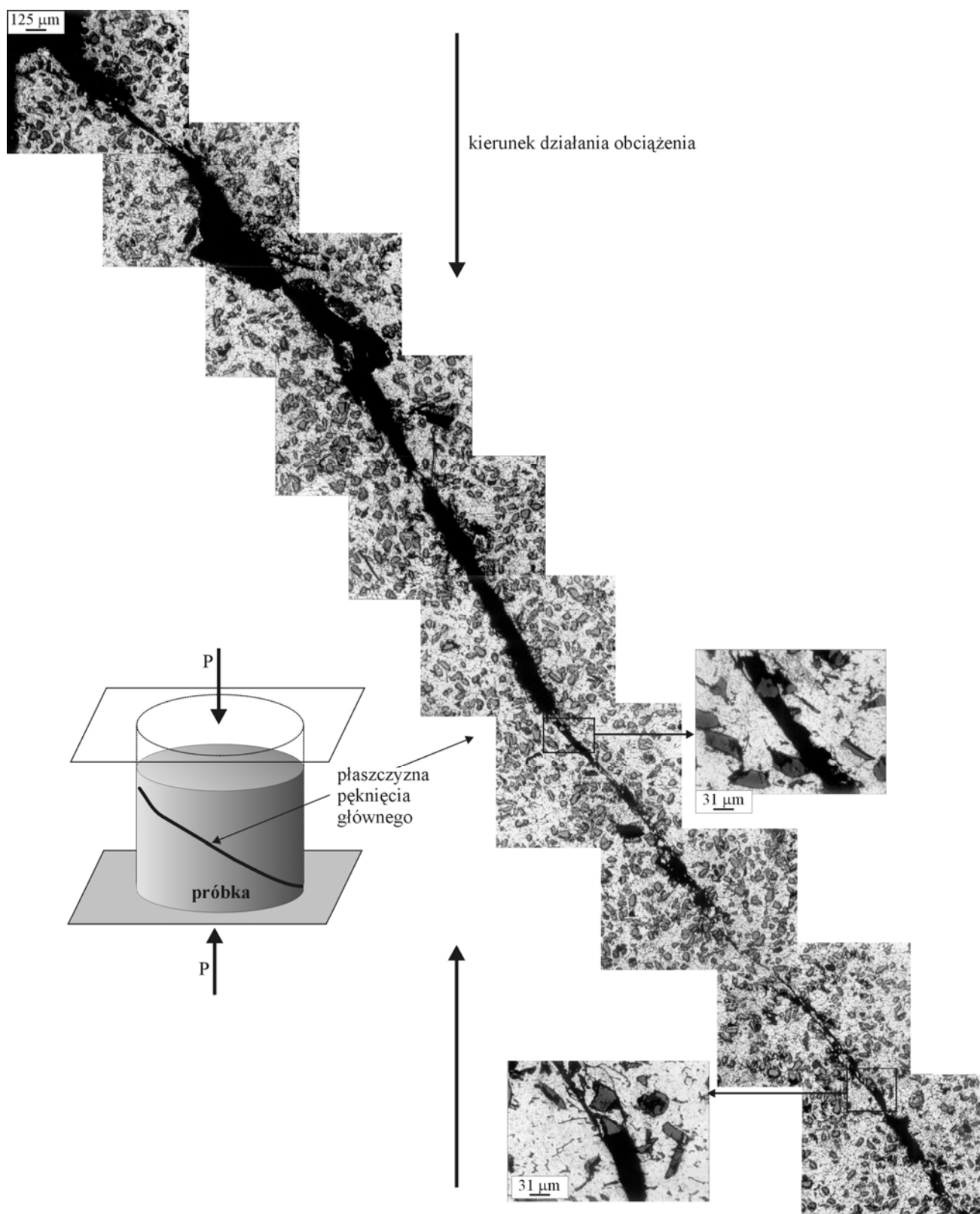


Rys. 3. Zależność umownej granicy plastyczności oraz wytrzymałości na ściskanie materiałów badawczych w funkcji udziału wagowego cząstek SiC

Fig. 3. Dependence yield strength and ultimate compression strength investigated materials in SiC particles weight fraction function

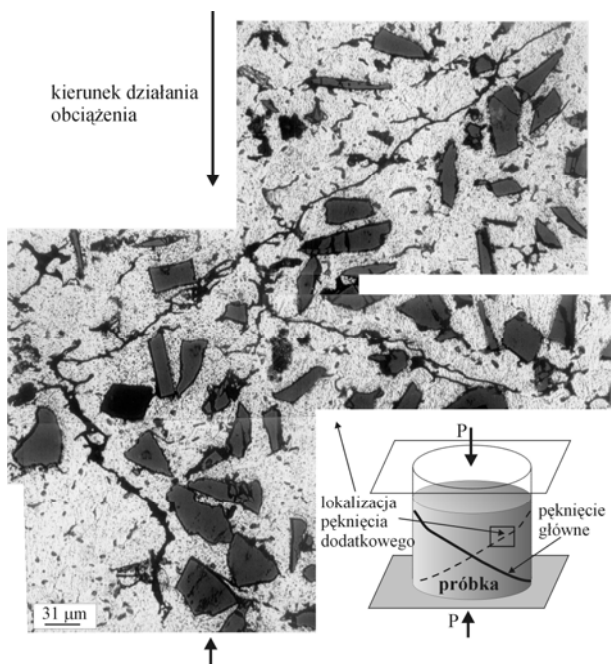
Wybór ścieżki pęknięcia w czasie działania obciążenia był zatem jednoznacznie uwarunkowany globalnymi cechami materiału oraz makroskopowym rozkładem naprężeń, a nie lokalnymi cechami materiału. Niemniej jednak w obszarze drugiej równoważnej, hipotetycznej, płaszczyzny pęknięcia obserwowano na zglądach obecność rozwiniętych dodatkowych pęknięć. Rysunek 5 przedstawia pęknięcia dodatkowe ujawnione w kompozycie zawierającym 30% wag. cząstek węgla krzemu wraz ze schematem ich usytuowania w próbce. Mikrografie zamieszczone na tym rysunku jednoznacznie dowodzą, że pęknięcia powstające w badanym materiale kompozytowym rozprzestrzeniały się po fazach stopu osnowy (fazach międzymetalicznych w przestrzeniach międzycząstkowych) z pominięciem granic rozdziału cząstka/osnowa i ich dekohezji. Pomimo że obserwowano w odkształconym materiale znaczną ilość pęknięć cząstek ceramicznych, rozwój pęknięcia kompozytu następował w materiale osnowy. Nie obserwowano rozwoju pęknięć od cząstek węgla krzemu lub po grani-

cach rozdziału komponentów. Świadczy to między innymi o silnym połączeniu między komponentami oraz bardzo istotnej roli mikrostruktury stopu osnowy w procesie odkształcania materiału kompozytowego.



Rys. 4. Ścieżka pęknięcia głównego utworzonego w kompozycie MgZn6 - 30% wag. SiC

Fig. 4. Principal cracking path created in MgZn6 - 30 wt.% SiC composite



Rys. 5. Ścieżka pęknięć dodatkowych powstałych w próbie ściskania kompozytu MgZn6 - 30% wag. SiC

Fig. 5. Additional cracking path formed in compression test of MgZn6 - 30 wt.% SiC composite

PODSUMOWANIE

Przedstawione wyniki badań zachowania się w próbie jednoosiowego ściskania kompozytów na osnowie stopu magnezu umacnianego cząstkami węgliku krzemu ukazują wysoką wytrzymałość na ściskanie tych materiałów. Badania wykazały wprost proporcjonalny wpływ udziału wagowego cząstek SiC zarówno na umowną granicę plastyczności, jak i wytrzymałość na ściskanie. Przeprowadzone analizy powstałych w próbie ściskania ścieżek pęknięcia ujawniły ponadto istotną rolę struktury stopu osnowy w rozwoju pęknięć w badanych kompozytach pod działaniem przyłożonej siły zewnętrznej oraz wytrzymałość połączenia między komponentami.

LITERATURA

- [1] Chua B.W., Lu L., Lai M.O., *Composite Structures* 1999, 47, 595-601.
- [2] Zheng M., Wu K., Yao C., Sato T., Tezuka H., Kamio A., Li D.X., *Materials Letters* 1999, 41, 57-62.
- [3] „Magnesium Alloys and Their Applications”, ed. K.U. Kainer, WILEY-VCH, 1998.
- [4] „Magnesium Alloys and Their Applications”, ed. K.U. Kainer, WILEY-VCH, 2000.

- [5] „Magnesium Alloys and Their Applications”, ed. K.U. Kainer, WILEY-VCH, 2003.
- [6] Braszczyńska K.N., Zyska A., Braszczyński J., *Kompozyty (Composites)* 2003, 3, 8, 353-358.
- [7] Zheng M., Wu K., Yao C., *Materials Science and Engineering* 2001, A318, 50-56.
- [8] Cai Y., Tan M.J., Shen G.J., Su H.Q., *Materials Science and Engineering* 2000, A282, 232-239.
- [9] Lianxi H., Erde W., *Materials Science and Engineering* 2000, A278, 267-271.
- [10] Saravanan R.A., Surappa M.K., *Materials Science and Engineering* 2000, A 276, 108-116.
- [11] Rokhlin L.L., Nikitina N.I., Dobotkina T.V., *Journal of Alloys and Compounds* 1996, 239, 209-213.
- [12] Xiaogin Z., Qudong W., Yizhen L., Yanping Z., Wenjiang D., Yunku Z., *Journal of Materials Processing and Technology* 2001, 112, 17-23.
- [13] Guangying Y., Yangsham S., Wenjiang D., *Scripta Materialia* 2000, 43, 1009-1013.
- [14] Hassan S.F., Gupta M., *Journal of Alloys Compounds* 2002, 335, 10.
- [15] Braszczyńska K.N., Lityńska L., Zyska A., Baliga W., *Materials Chemistry & Physics* 2003, 81, 326-328.
- [16] Braszczyńska K.N., *Zeitschrift für Metallkunde* 2003, 94, 2, 144-148.
- [17] Braszczyńska K.N., Zyska A., *Acta Metallurgica Slovaca* 2002, 8 (2/2), 237-243.
- [18] Braszczyńska K.N., Bochenek A., *Science and Engineering of Composite Materials* 2000, Vol. 9, No 3, 149-158.
- [19] Bochenek A., Braszczyńska K.N., *Metal Matrix Composites and Metallic Foams*, ed. T.W. Clayne, F. Simancik, WILEY-VCH, 1999, Vol. 5, 233-236.
- [20] Braszczyńska K.N., Bochenek A., *Kompozyty (Composites)* 2001, 1, 1, 28-31.
- [21] Braszczyńska K.N., *Analiza procesu pęknięcia kompozytów magnezowych umacnianych cząstkami węgliku krzemu*, IV Seminarium Ogólnopolskie PTMK Kompozyty - Teoria i praktyka, Ustroń-Jaszowiec, 29-31 marca 2000, 231-236.
- [22] Braszczyńska K.N., Zyska A., *Archiwum Odlewnictwa* 2002, 4, 320-325.
- [23] Bochenek A., Braszczyńska K.N., *The fracture toughness of magnesium composites reinforced with silicon carbide particles*, 2nd ESIS TC4 Conference on Fracture of Polymers, Composites and Adhesives, Les Diablerets, Szwajcaria, 13-15 September 1999, 173.
- [24] Braszczyńska K.N., *Structure and properties of magnesium matrix composites*, Inter. Conf. Advances in Metals and Processing Technologies AMPT, Madryt, September 2001, 297-304.

Recenzent
Józef Gawroński