

**Małgorzata Łągiewka\*, Zbigniew Konopka, Andrzej Zyska, Maciej Nadolski**

*Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej, Katedra Odlewnictwa  
al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa, Poland*

*\* Corresponding author. E-mail: cis@wip.pcz.pl*

Otrzymano (Received) 10.02.2009

## WPLÝW CIĘTYCH WŁÓKIEN WĘGLOWYCH NA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE KOMPOZYTU NA OSNOWIE STOPU AISi10Mg

Przedstawiono wyniki badań własności mechanicznych kompozytów na osnowie stopu AISi10Mg z ciętymi włóknami węglowymi o długości 4 mm i średnicy 7  $\mu\text{m}$  przy udziale objętościowym wynoszącym 5 i 10%. Pierwszą partię kompozytów wytworzono metodą odlewania grawitacyjnego zawiesiny kompozytowej, drugą metodą prasowania w stanie ciekło-stalym. Pręty o średnicy 15 mm odlewano grawitacyjnie do form metalowych, a prasowanie odlewów płyty o grubości 15 mm wykonano na prasie hydraulicznej przy ciśnieniu 100 MPa. Z odlewów wycięto próbki do badań wytrzymałości na rozciąganie, granicy plastyczności, modułu Younga oraz wydłużenia. Po wykonaniu badań mechanicznych z zerwanych próbek wykonano zglądy metalograficzne, dzięki którym przeprowadzono obserwacje mikrostruktury badanych materiałów. Bardziej równomierne rozmieszczenie włókien w kompozytach zaobserwowano w próbkach odlewanych grawitacyjnie w porównaniu z próbkami prasowanymi. Natomiast struktura osnowy była bardziej rozdrobiona w kompozytach prasowanych w stanie ciekło-stalym w porównaniu z kompozytami odlewanych grawitacyjnie. Po przeprowadzeniu badań mechanicznych stwierdzono wzrost własności wytrzymałościowych oraz spadek wydłużenia kompozytów w porównaniu z właściwościami stopu osnowy zarówno w przypadku próbek prasowanych, jak i odlewanych grawitacyjnie. Porównując własności mechaniczne próbek prasowanych i odlewanych, zaobserwowano korzystniejsze zmiany własności w odlewach prasowanych w stanie ciekło-stalym w porównaniu do kompozytów odlewanych grawitacyjnie. Stwierdzono również, że dodatek 5% włókien węglowych spowodował największą poprawę własności mechanicznych badanych materiałów. Dodatek 10% włókien węglowych również spowodował poprawę własności mechanicznych w porównaniu z nieuzbrojoną osnową, jednak nie tak znaczną jak w przypadku dodatku 5% ciętych włókien węglowych.

Słowa kluczowe: stopy aluminium, kompozyty metalowe, włókna węglowe, własności mechaniczne

## THE INFLUENCE OF CHOPPED CARBON FIBRE ON MECHANICAL PROPERTIES OF AISi10Mg ALLOY MATRIX COMPOSITE

The work presents a comparison of results concerning mechanical properties of AISi10Mg alloy matrix composites reinforced with chopped carbon fibre of 4 mm length and 7  $\mu\text{m}$  diameter, added in amount of 5 or 10 volume percent. First series of samples have been produced by gravity casting of composite suspension, the second one by squeezing in semi-solid state. Bar-shaped specimens of 15 mm diameter have been gravity cast into a metal mould, while 15 mm thick plates have been squeezed by means of hydraulic press under the pressure equal to 100 MPa. Specimens cut out of the achieved castings have been tested for tensile strength, yield point, Young's modulus and elongation. Metallographic microsections of the broken samples have been prepared after performing mechanical tests in order to examine microstructures of the tested materials. It has been found that more uniform arrangement of carbon fibre has been achieved in gravity castings as compared with squeezed samples, whereas the matrix structure has been better refined in casting squeezed in mushy (semi-solid) state than in gravity cast composite samples. Mechanical examinations have revealed an increase in strength properties and a drop in elongation for composite castings, produced by both gravity and squeeze casting technologies, as compared with pure matrix alloy castings. Comparing in turn the two types of produced composites it can be noticed that the achieved changes of examined properties have been more beneficial for composites squeezed in semi-solid state than for gravity cast composites. It has been also found that an addition of carbon fibre in amount of 5 volume percent has resulted in the greatest improvement of mechanical properties of the examined materials. An addition of 10% of carbon fibre has also caused an improvement in mechanical properties as compared with the pure matrix alloy, but not so significant as in the case of 5% addition of chopped carbon fibre.

Keywords: aluminium alloys, metal composites, carbon fibre, mechanical properties

## WPROWADZENIE

Materiały kompozytowe o osnowie metalowej wzmocniane nieciągłymi włóknami stanowią grupę materiałów, których własności są połączeniem własności osnowy i włókien wzmocniających, ale ze względu na przypadkowe rozmieszczenie i orientację zbrojenia nie można obliczyć właściwości mechanicznych z prawa mieszanin [1, 2]. Znane pozytywne rezultaty umacniania polimerów i ceramiki ciętymi włóknami są wykorzystywane także w badaniach kompozytów metalowych, które mogą spełniać oczekiwania konstruktorów i projektantów niemożliwe do uzyskania w materiałach tradycyjnych. Kompozyty metalowe stanowią najbardziej rozwijającą się grupę materiałów, która cieszy się ogromnym zainteresowaniem wśród specjalistów wszystkich branż. Kompozyty na osnowach metalowych z włóknami ciętymi wytwarza się metodą metalurgii proszków, infiltracji preform ciekłymi metalami i odlewaniem zawieszinowym.

W procesach wytwarzania elementów ze stopów oraz kompozytów wykorzystujących ciekły metal rozwinęły się dynamicznie takie technologie odlewnicze, jak: odlewanie grawitacyjne, ciśnieniowe, odśrodkowe, a także prasowanie odlewów w stanie ciekło-stałym [3-5]. Obecność wysokowytrzymałych ciętych włókien ceramicznych w kompozycie zmienia stan naprężenia i odkształcenia szczególnie w procesie pęknięcia materiału, tworząc rozwiniętą powierzchnię przełomu, co znacznie zwiększa pracę zniszczenia [6, 7]. Włókna cięte rozmieszczone w sposób przypadkowy nie umacniają materiału tak skutecznie, jak ułożone równolegle włókna ciągłe, które można tak zorientować, aby otrzymać maksymalnie dużą wytrzymałość, ale właśnie skuteczniej zwiększają odporność na pęknięcie kompozytu. Przecięcie krótkich włókien nie powoduje degradacji własności mechanicznych materiału kompozytowego, więc możliwe jest stosowanie procesów obróbki ubytkowej półproduktów oraz produktów o ostatecznych kształtach wytworzonych z tych materiałów, takich jak: wiercenie, frezowanie czy szlifowanie bez ryzyka osłabiania przekroju [1].

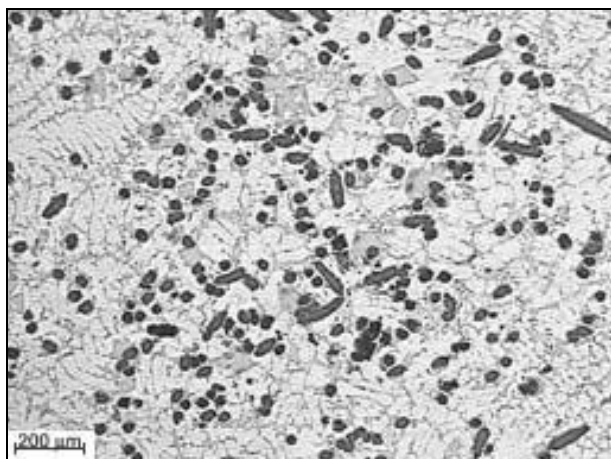
Własności mechaniczne kompozytów włóknistych zależą nie tylko od własności samych włókien, ale przede wszystkim od tego, w jakim stopniu obciążenie jest przekazywane z osnowy do włókien. Kompozyty ulegają zniszczeniu dopiero wówczas, gdy duża liczba sąsiednich włókien pęknie i powstanie skupisko pękniętych włókien o krytycznej wielkości. Szczególnie w przypadku włókien ciętych o dużej wytrzymałości i ciągliwej osnowie bardzo ważne jest to, aby granica między włóknami a osnową była wystarczająco mocna do przekazywania obciążenia od jednej do drugiej fazy [2, 8]. Pierwotny stan naprężeń w odlewach kompozytowych jest w dużej mierze wynikiem stosowanej technologii, a szczególne znaczenie ma tutaj metoda prasowania (squeeze casting). Metoda ta jest jedną z najnowszych metod wytwarzania

kompozytów z włóknem krótkim. W technologii tej metal w stanie ciekło-stałym wprowadza się do podgrzanej formy, a następnie mechanicznie wywiera ciśnienie na metal za pomocą tłoka prasującego, a uzyskiwane wartości ciśnień mieszczą się zwykle w zakresie 50÷150 MPa [9]. Wysokie wartości ciśnień stosowane w tej metodzie i szybkie stygnięcie zmniejszają porowatość odlewów, rozdrabniają strukturę osnowy, a tym samym podwyższają właściwości mechaniczne kompozytu [6, 10, 11]. Dodatkowo produkcja cechuje się wysoką efektywnością ekonomiczną, z możliwością pełnej automatyzacji, przydatną zwłaszcza w produkcji wielkoseryjnej. Metodę prasowania w technologii kompozytów wykorzystuje się powszechnie do procesu nasycania ciekłym stopem preform umieszczanych w formie i stanowiących umocnienie kompozytu [4].

## METODYKA I WYNIKI BADAŃ

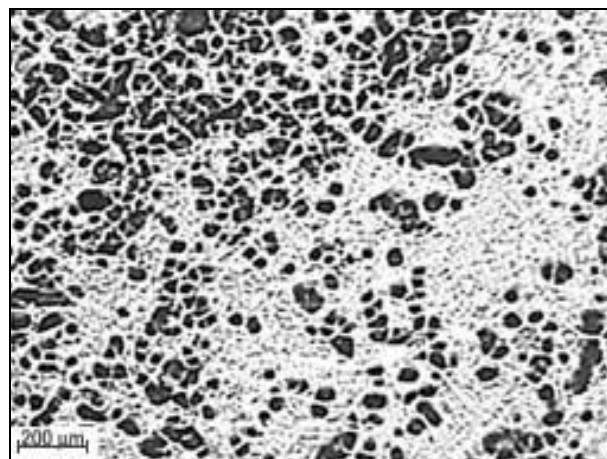
Wytworzono kompozyty na osnowie stopu AlSi10Mg zbrojonego ciętymi włóknami węglowymi o długości 4 mm i średnicy 7  $\mu$ m przy udziale objętościowym wynoszącym 5 i 10%, wytworzonych metodą odlewania grawitacyjnego zawiesziny kompozytowej oraz metodą prasowania w stanie ciekło-stałym. Zawieszinę kompozytową sporządzono metodą mieszania. W tym celu ciekły stop topiono w piecu indukcyjnym tyglowym i przegrzewano do temperatury 930 K, a następnie za pomocą ryny dozującej wprowadzono cięte włókna węglowe (WW) bez żadnej preparacji ich powierzchni. Zawieszinę odlewano grawitacyjnie do formy metalowej w kształcie pręta  $\varnothing$ 15 mm, a pozostałą porcję zawiesziny schładzano do stanu ciekło-stałego i prasowano w formie prostopadłościowej o wymiarach 100x50x15 mm. Prasowanie wykonywano na prasie hydraulicznej PHM - 250c pod ciśnieniem 100 MPa, a próbki przetrzymywano pod zadaniem ciśnieniem przez 20 s. Z odlewów wycięto próbki w celu badania następujących właściwości mechanicznych: granica plastyczności  $R_{02}$ , wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$ , moduł sprężystości  $E$  oraz wydłużenie względne  $A_5$ . Wszystkie pomiary wykonano w próbie rozciągania na zrywarce Zwick 1488. Wykonano trzy równoległe pomiary dla każdego rodzaju kompozytu i porównawczo dla stopu osnowy.

Z wytworzonych odlewów wycięto również próbki do obserwacji mikrostruktury badanych kompozytów. Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono strukturę kompozytu zawierającego 5 i 10% WW odlewanych grawitacyjnie. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono strukturę kompozytu zawierającego 5 i 10% WW prasowanego w stanie ciekło-stałym. Na rysunku 5 przedstawiono strukturę osnowy kompozytu w odlewie grawitacyjnym, a na rysunku 6 w odlewie prasowanym.



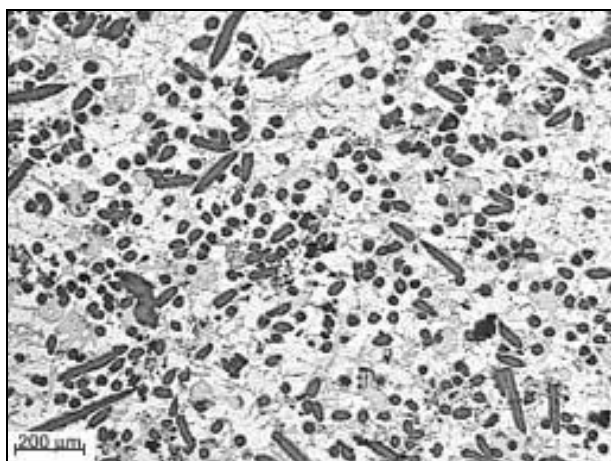
Rys. 1. Mikrostruktura kompozytu AlSi10Mg 5% WW, odlew grawitacyjny

Fig. 1. Microstructure of AlSi10Mg - 5% carbon fibre composite, gravity casting



Rys. 4. Mikrostruktura kompozytu AlSi10Mg z 10% WW, odlew prasowany

Fig. 4. Microstructure of AlSi10Mg - 10% carbon fibre composite, squeezed casting



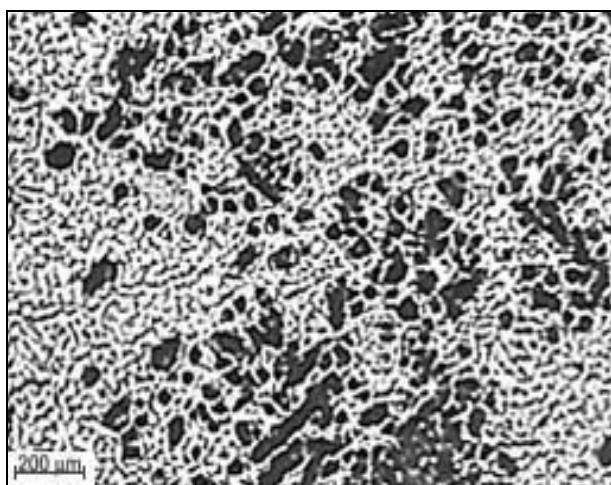
Rys. 2. Mikrostruktura kompozytu AlSi10Mg z 10% WW, odlew grawitacyjny

Fig. 2. Microstructure of AlSi10Mg - 10% carbon fibre composite, gravity casting



Rys. 5. Mikrostruktura stopu AlSi10Mg, odlew grawitacyjny

Fig. 5. Microstructure of AlSi10Mg alloy, gravity casting



Rys. 3. Mikrostruktura kompozytu AlSi10Mg 5% WW, odlew prasowany

Fig. 3. Microstructure of AlSi10Mg - 5% carbon fibre composite, squeezed casting



Rys. 6. Mikrostruktura kompozytu AlSi10Mg odlew prasowany

Fig. 6. Microstructure of AlSi10Mg alloy, squeezed casting

Analizując struktury badanych kompozytów, należy stwierdzić, że bardziej równomiernym rozmieszczeniem ciętych włókien charakteryzują się kompozyty odlewane

grawitacyjnie w porównaniu z kompozytami prasowanymi w stanie ciekło-stałym. Zaobserwowano liczne skupiska włókien węglowych w próbkach prasowanych zarówno dla kompozytu zawierającego 5, jak i 10% włókien węglowych.

Metoda squeeze casting powoduje korzystne zmiany struktury stopu osnowy. W badanych próbkach uzyskano bardziej rozdrobioną strukturę stopu prasowanego w porównaniu ze stopem odlewany grawitacyjnie. Rozdrobienie struktury w próbkach prasowanych jest spowodowane zarówno ciśnieniem zewnętrznym działającym na próbkę, jak i krótszym czasem krzepnięcia próbek wykonanych metodą squeeze casting w porównaniu z odlewami wykonanymi metodą tradycyjną.

W tabeli 1 przedstawiono średnie arytmetyczne z trzech pomiarów wytrzymałości na rozciąganie, granicy plastyczności, modułu Younga oraz wydłużenia dla badanych kompozytów i stopu osnowy odlewanych grawitacyjnie. W tabeli 2 zaprezentowano średnie arytmetyczne z trzech pomiarów własności mechanicznych badanych materiałów wykonanych metodą squeeze casting.

TABELA 1. Właściwości mechaniczne stopu AlSi10Mg i kompozytów odlewanych grawitacyjnie  
TABLE 1. Mechanical properties of AlSi10Mg alloy and gravity cast composites

Badana własność	Odlewy grawitacyjne		
	AlSi10Mg	AlSi10Mg + 5% WW	AlSi10Mg + 10% WW
$R_m$ , MPa	233	240	234
$R_{0,2}$ , MPa	144	171	163
$E$ , GPa	75	111	109
$A_5$ , %	1,14	1,04	0,98

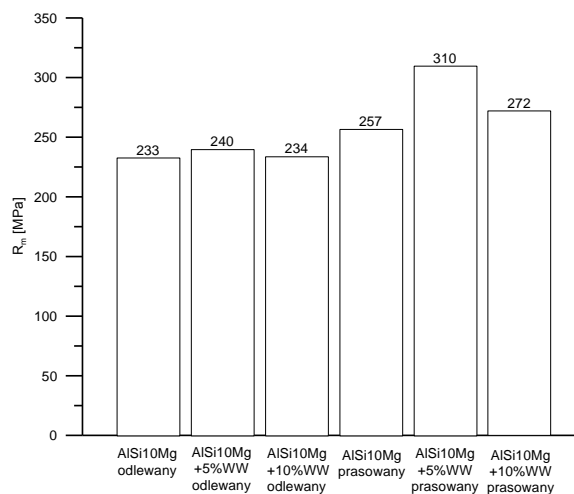
TABELA 2. Właściwości mechaniczne stopu AlSi10Mg i kompozytów prasowanych w stanie ciekło-stałym  
TABLE 2. Mechanical properties of AlSi10Mg alloy and squeezed composites

Badana własność	Odlewy prasowane		
	AlSi10Mg	AlSi10Mg + 5% WW	AlSi10Mg + 10% WW
$R_m$ , MPa	257	310	272
$R_{0,2}$ , MPa	153	193	169
$E$ , GPa	81	144	128
$A_5$ , %	1,91	1,38	1,23

Na rysunkach 7-10 przedstawiono graficznie wyniki badań własności mechanicznych kompozytów i stopu osnowy.

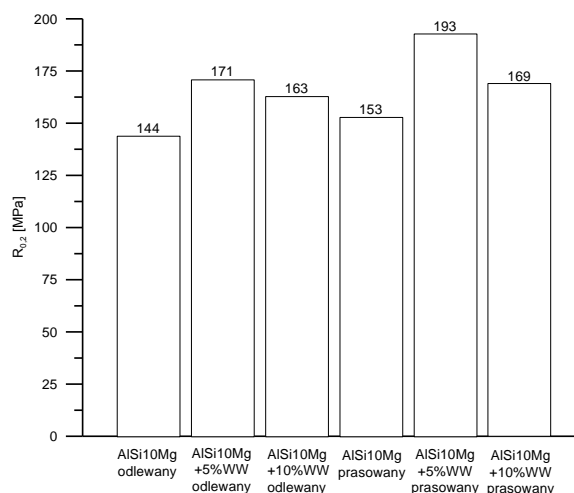
Z przeprowadzonych badań wynika, że granica plastyczności  $R_{0,2}$ , wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$  oraz moduł sprężystości  $E$  wykazują najlepsze wartości dla kompozytu prasowanego w stanie ciekło-stałym przy 5% udziale włókien węglowych. Dwie pierwsze własności w porównaniu do czystego stopu AlSi10Mg polepszyły się średnio o ok. 20%, a wartości modułu sprężystości

wzrosły nawet o ok. 45%. Świadczy to o bardzo korzystnym wpływie włókien węglowych na osnowę stopu AlSi10Mg.



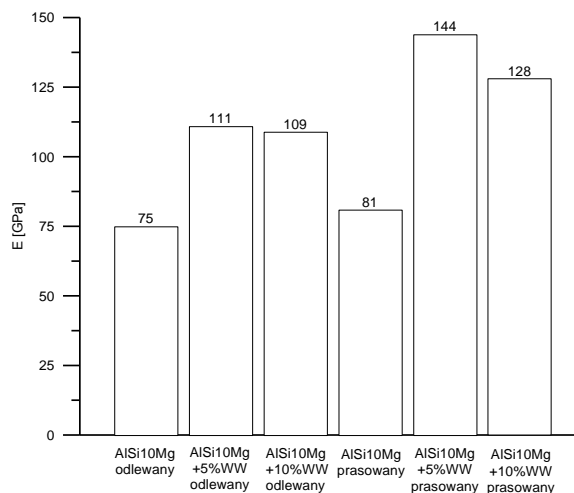
Rys. 7. Wytrzymałość na rozciąganie badanych materiałów

Fig. 7. Tensile strength of examined materials



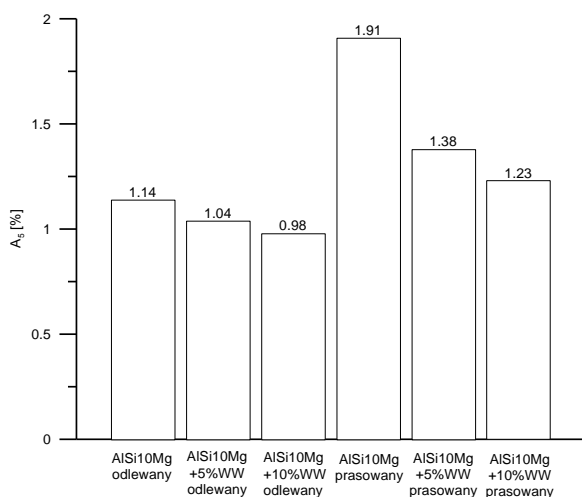
Rys. 8. Granica plastyczności badanych materiałów

Fig. 8. Yield stress of examined materials



Rys. 9. Moduł Younga badanych materiałów

Fig. 9. Young's modulus of examined materials



Rys. 10. Wydłużenie badanych materiałów

Fig. 10. Unit elongation of examined materials

Wyniki badań wydłużenia względnego wykazały, że zwiększenie zawartości włókna w kompozycie powoduje obniżenie wartości tej własności o około 40%. Dla kompozytów zawierających 10% włókien zaobserwowano podobne zależności, kompozyty te charakteryzowały się niższymi wartościami zarówno granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie, modułu Younga, jak i wydłużenia w porównaniu z kompozytami zawierającymi 5% WW.

## PODSUMOWANIE

Z przedstawionych badań wynika, że korzystniejszą od odlewania grawitacyjnego jest technologia wytwarzania kompozytów z krótkim włóknem węglowym poprzez prasowanie w stanie ciekło-stałym. Każda z badanych własności (z wyjątkiem wydłużenia) wykazała zdecydowanie wyższe wartości w przypadku próbek prasowanych w porównaniu z próbkami odlewany grawitacyjnie mimo tego, iż włókna węglowe były bardziej równomiernie rozmieszczone w przypadkach odlewów grawitacyjnych. Ciśnienie prasowania ma pozytywny wpływ na jakość odlewów, przede wszystkim eliminuje występowanie porowatości i innych nieciągłości struktury. Większa szybkość krzepnięcia powoduje przede wszystkim rozdrobnienie struktury materiału osnowy, co w konsekwencji prowadzi do polepszenia własności mechanicznych badanych materiałów. Analizując otrzymane wyniki,

można stwierdzić, że metoda squeeze casting daje zadowalające wyniki i jest aktualnie jedną z wiodących i najbardziej perspektywicznych technologii wytwarzania odlewanych materiałów kompozytowych. Wprowadzenie do stopu AlSi10Mg nawet niewielkiej ilości włókien węglowych spowodowało znaczną poprawę wytrzymałości na rozciąganie, zwiększenie granicy plastyczności oraz modułu Younga.

## LITERATURA

- [1] Dobrzański L.A., Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwie, Materiały użytkowe, projektowanie i modelowanie, WNT, Warszawa 2003.
- [2] Dobrzański L.A., Metalowe materiały inżynierskie, WNT, Warszawa 2004.
- [3] Zyska A., Konopka Z., Łągiewka M., Nadolski M., The Influence of Squeeze Casting Parameters on the Mechanical Properties of AlZn5Mg Alloy, Archives of Foundry Engineering 2008, 8 Spec. Issue 1, 347-350.
- [4] Zyska A., Konopka Z., Łągiewka M., The Solidification of Squeeze Cast AlCu4Ti Alloy, Archives of Foundry Engineering 2007, 7, 4, 193-196.
- [5] Zyska A., Konopka Z., Łągiewka M., Właściwości mechaniczne stopu AlCu4 prasowanego w stanie ciekłym, Nowe technologie i osiągnięcia w metalurgii i inżynierii materiałowej, Materiały VIII Międzynarodowej Konferencji Naukowej, T. 2, Częstochowa 2007, 731-734.
- [6] Konopka Z., Chmielowiec P., Zyska A., Łągiewka M., Bala-wejder R., Fracture Toughness Examination of the Aluminium Matrix Composite Reinforced with Chopped Carbon Fibres, Archiwum Odlewnictwa 2006, 6, 18(1/2), 279-284.
- [7] Konopka Z., Zyska A., Łągiewka M., Bober A., Nocuń S., The Effect of the Ni Coating of Carbon Fibres on their Bonding with AlSi13Cu2 Matrix in Pressure die Cast Composites, COMMENT'2005, Worldwide Congress on Materials and Manufacturing Engineering and Technology, Gliwice - Wisła 2005, 190 (abstract+pełny tekst na CD-ROM, 69-72).
- [8] Boczkowska A., Kapuściński J., Lindemann Z., Kompozyty, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
- [9] Nowacki J., Materiały kompozytowe, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1993.
- [10] Konopka Z., Cisowska M., Analiza rozmieszczenia włókien węglowych w kompozycie na osnowie stopu AK7 wykonanego metodą Squeeze Casting, Archiwum Odlewnictwa 2002, 2, 4, 384-389.
- [11] Konopka Z., Bober A., Odporność na pękanie prasowanych kompozytów AK7 - krótkie włókna węglowe, V Międzynarodowa Sesja Naukowa Nowe technologie i osiągnięcia w metalurgii i inżynierii materiałowej, Częstochowa 2004, Cz. 2, 622-625.