

**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

## WPŁYW RODZAJU ZBROJENIA NA ROZSZERZALNOŚĆ CIEPLNĄ METALOWYCH MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH

Przedstawiono wyniki badań rozszerzalności cieplnej kompozytów metalowych na osnowie stopu AlMg9. W celu przeprowadzenia badań wytworzono kompozyty zawierające zbrojenie w postaci ciętych włókien węglowych oraz cząstek grafitu. Stosowano włókna węglowe o długości 4 mm i średnicy 7  $\mu\text{m}$ , a średnia wielkości grafitu mieściła się w przedziale od 100 do 160  $\mu\text{m}$ . Udziały objętościowe zbrojenia w kompozytach wynosiły odpowiednio 5, 10 i 20%. Odlewy kompozytowe wykonane zostały poprzez zasysanie uprzednio przygotowanej zawiesiny kompozytowej do rurek kwarcowych o średnicy 9 mm. Badania rozszerzalności cieplnej przeprowadzono za pomocą dylatometru automatycznego. Próbki do badań dylatometrycznych miały kształt walcowy o długości ok. 35 mm i średnicy 7 mm. W celu określenia stabilizacji wymiarowej próbki nagrzewano do temperatury 400°C z prędkością 1 K/s i następnie chłodzono do temperatury otoczenia z tą samą prędkością. Z zarejestrowanych zmian długości próbki wraz ze wzrostem temperatury wykreślono krzywe dylatometryczne. Na podstawie przebiegu krzywych dylatometrycznych określono zmiany wymiarowe próbek po cyklu nagrzewania i chłodzenia. Największym skróceniem próbek charakteryzował się stop osnowy - skrócenie próbki wynosi 0,046 mm, najmniejszym kompozyt zawierający 20% cząstek grafitu, w którym w ogóle nie zaobserwowano zmian wymiarowych. Następnie obliczono chwilowe współczynniki liniowej rozszerzalności cieplnej badanych materiałów ze wzoru (1). Wyniki badań pokazują, że współczynnik rozszerzalności cieplnej w badanych kompozytach jest wyższy niż dla stopu osnowy. Dla kompozytów zawierających cząstki grafitu różnice te nie są aż tak znaczące, natomiast dla kompozytów z krótkimi włóknami węglowymi współczynniki rozszerzalności cieplnej przyjmują znacznie wyższe wartości. Przyczyną tego zjawiska może być mikroporowatość odlewów kompozytowych, której podczas wytwarzania zawiesin kompozytowych bardzo trudno uniknąć. Inną przyczyną może być również brak połączeń adhezyjnych pomiędzy osnową a zbrojeniem w badanych kompozytach. Z przeprowadzonych badań jednoznacznie wynika, że wprowadzenie do stopu osnowy zbrojenia w postaci cząstek grafitu powoduje stabilizację wymiarową odlewów, natomiast wprowadzenie krótkich włókien węglowych poprawia stabilizację wymiarową stopu osnowy jednak w dużo mniejszym stopniu niż cząstki grafitu.

Słowa kluczowe: kompozyty, rozszerzalność cieplna, współczynnik rozszerzalności cieplnej, stopy aluminium

## THE INFLUENCE OF THE REINFORCEMENT TYPE ON THERMAL EXPANSION OF METAL MATRIX COMPOSITES

The examination results concerning thermal expansion of AlMg9 alloy matrix composites have been presented in the work. Composites reinforced with chopped carbon fibre or graphite particles have been produced for experimental purpose. The length and the diameter of the applied carbon fibre has been equal to 4 mm and 7  $\mu\text{m}$ , respectively, while graphite particles has been of 100÷160  $\mu\text{m}$  average size. The volume percentage of the reinforcement has been selected to be 5, 10, or 20%. The composite castings have been produced by suction of beforehand prepared composite suspension into silica pipes of 9 mm diameter. The examination of thermal expansion has been held by means of an automatic dilatometer. The examined cylindrical specimens have the length of about 35 mm and 7 mm diameter. Specimens have been heated up to 400°C at the rate of 1K/s and then cooled to the ambient temperature at the same rate to determine their dimensional changes. The recorded changes of length against temperature have been presented in the form of dilatometric curves, which in turn have enabled to determine dimensional changes after heating and cooling cycle. The greatest shortening of specimens - 0.046 mm - has been observed for pure matrix alloy, the least one has been recorded for composite with 20% of graphite, which has revealed no dimensional changes at all. Then the instantaneous coefficients of thermal expansion have been calculated according to Formula 1. The results of examinations show that the coefficient of thermal expansion is greater for composites than for matrix alloy. The differences are of minor significance for composites containing graphite particles, but for composites with carbon fibre the coefficient of thermal expansion reaches much greater values. The reason of this phenomenon can be the microporosity of composite castings, which is difficult to avoid during production of composite suspension. Another reason can be also the lack of adhesive bond between the matrix and the reinforcement in the examined composites. The performed tests allow for undoubted conclusion that introducing particulate graphite reinforcement into the matrix alloy results in the dimensional stability of castings, while introducing chopped carbon fibre, though improves the dimensional stability, nevertheless to the significantly less degree than graphite particles.

Keywords: composites, thermal expansion, coefficient of thermal expansion, aluminium alloys

## WPROWADZENIE

Elementy wykonane z metali i ich stopów poddane procesom cieplnym charakteryzują się tym, że towarzyszą im zmiany wymiarowe wraz ze wzrostem temperatury. W przypadku stopów aluminium mówi się o dwóch rodzajach zmian wymiarowych, są to zmiany odwracalne i nieodwracalne [1]. Odwracalne są zależne wyłącznie od temperatury i określane są wartością liniowego i objętościowego współczynnika rozszerzalności cieplnej [2]. Trwale są wynikiem rozpuszczania składników stopowych w roztworach stałych podczas przesycania odlewów oraz następstwem procesów wydzieleniowych podczas starzenia sztucznego czy pracy elementu w podwyższonych temperaturach. Metalowe materiały kompozytowe mają bardzo szerokie zastosowanie w budowie maszyn i urządzeń. Uzyskiwany przez kompozyty metalowe zespół własności mechanicznych predysponuje właśnie te materiały do pracy w podwyższonych temperaturach [3]. Wytwarzanie kompozytów metalowych polega na komponowaniu ze sobą różnych składników, często o diametralnie różnych własnościach, co daje możliwość sterowania własnościami kompozytów, w tym także rozszerzalnością cieplną. Ze względu na znacznie różniące się wartości współczynników rozszerzalności cieplnej materiału osnowy i zbrojenia istnieje niebezpieczeństwo zerwania połączenia zbrojenie-osnowa oraz istnieje obawa, że elementy wykonane z kompozytów metalowych nie zachowają stabilności wymiarowej [4]. Z badań wielu autorów wynika, że wraz ze wzrostem udziału objętościowego zbrojenia w osnowie, np. stopu aluminium, współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej maleje, co wynika z niskich wartości współczynnika liniowej rozszerzalności materiałów powszechnie stosowanych na zbrojenie materiałów ceramicznych [3].

Wśród metod badań rozszerzalności cieplnej kompozytów wymienić można metody dylatometryczne i metody rentgenowskie. Metody te można podzielić na metody bezpośrednie, metody pośrednie, w których rozszerzalność cieplna określa się poprzez pomiar innych parametrów fizycznych, oraz metody autograficzne, w wyniku których otrzymuje się wykres, z którego odczytujemy takie parametry, jak: wydłużenie, współczynnik rozszerzalności cieplnej czy temperatury przemian fazowych [5].

## METODYKA I WYNIKI BADAŃ

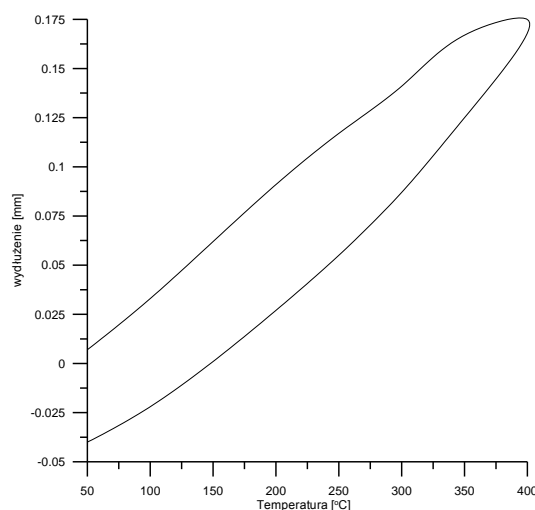
W celu przeprowadzenia badań rozszerzalności cieplnej wykonano kompozyty umacniane ciętymi włóknami węglowymi oraz kompozyty zawierające cząstki grafitu. Osnową kompozytów był stop AlMg9. Długość włókien węglowych wynosiła 4 mm, średnica 7  $\mu\text{m}$ , a średnia wielkości grafitu mieściła się w przedziale od 100 do 160  $\mu\text{m}$ . Wytworzono kompozyty zawierające 5, 10 i 20% obj. zbrojenia. Stop osnowy topiono i przegrzewano do temperatury 930 K, następnie do ciekłego

stopu wprowadzano za pomocą rynnki dozującej odpowiednie ilości fazy zbrojącej. Zawieszinę kompozytową wytwarzano poprzez mieszanie zawartości tygla odpowiednio przygotowanym do tego celu mieszałem. Cały proces wytwarzania zawieszin kompozytowych był przeprowadzony pod osłoną argonu. Parametry wytwarzania zawieszin kompozytowych zostały ustalone na podstawie wielu wcześniejszych prób. Próbkę do badań dylatometrycznych zostały wykonane poprzez zasysanie zawieszin do rurek kwarcowych średnicy 9 mm. Po zakrzepnięciu stopu wycięto próbki do badań dylatometrycznych. Długość próbki wynosiła 35 mm, średnica 7 mm. W celach porównawczych wykonano również metodą zasysania próbki ze stopu osnowy AlMg9. Badania dylatometryczne przeprowadzono za pomocą dylatomatycznego DA-3. W celu określenia stabilności wymiarowej każdą z próbek poddano procesowi nagrzewania do temperatury 40°C z prędkością 1 K/s, a następnie chłodzono do temperatury otoczenia z tą samą prędkością. Po wykonaniu pomiarów na dylatometrze wykreślono krzywe dylatometryczne, a następnie wyznaczono wartości współczynników rozszerzalności cieplnej ze wzoru

$$\alpha_{\Delta T} = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T} \quad (1)$$

gdzie  $\alpha_{\Delta T}$  jest współczynnikiem rozszerzalności cieplnej,  $\Delta l$  wydłużeniem bezwzględnym,  $l_0$  długością początkową próbki, a  $\Delta T$  przyrostem temperatury.

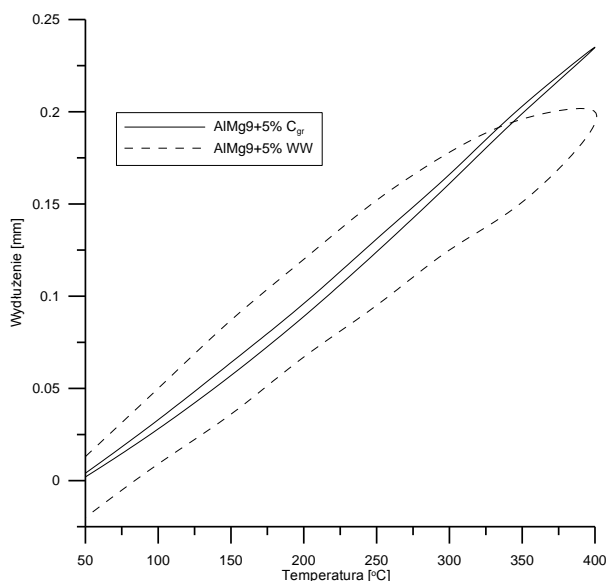
Wykresy badań rozszerzalności cieplnej przedstawiono w postaci wykresów bezwzględnego wydłużenia próbek w funkcji temperatury. Krzywe dylatometryczne badanych materiałów przedstawiono na rysunkach 1-4. Na rysunkach tych górna krzywa jest krzywą nagrzewania, dolna krzywą chłodzenia. Rysunek 1 przedstawia krzywą nagrzewania i chłodzenia dla stopu osnowy. Po cyklu nagrzewania i chłodzenia próbka uległa skróceniu o 0,046 mm.



Rys. 1. Dylatogram stopu AlMg9

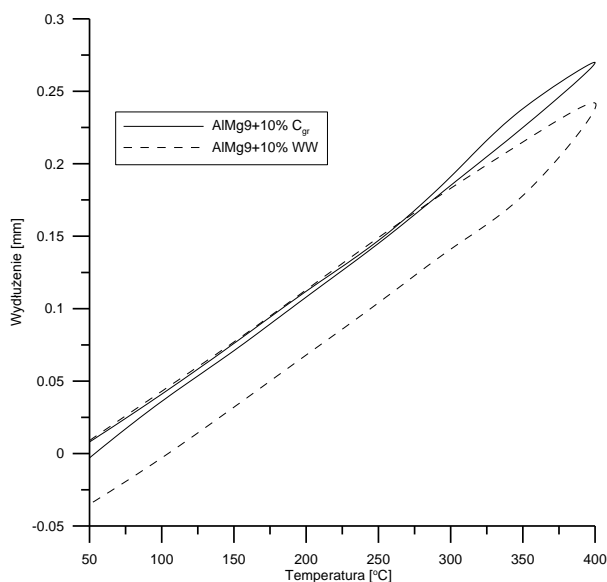
Fig. 1. Dilatometric curve for AlMg9 alloy

Na rysunku 2 przedstawiono krzywe nagrzewania i chłodzenia kompozytu zawierającego 5% cząstek grafitu i 5% włókien węglowych. Próbkę z kompozytu zbrojonego cząstkami grafitu uległa skróceniu o 0,0015 mm, a próbka zbrojona włóknem węglowym o 0,034 mm.



Rys. 2. Dylatogramy kompozytów zawierających 5% zbrojenia  
Fig. 2. Dilatometric curve for AlMg9+5% reinforcement composites

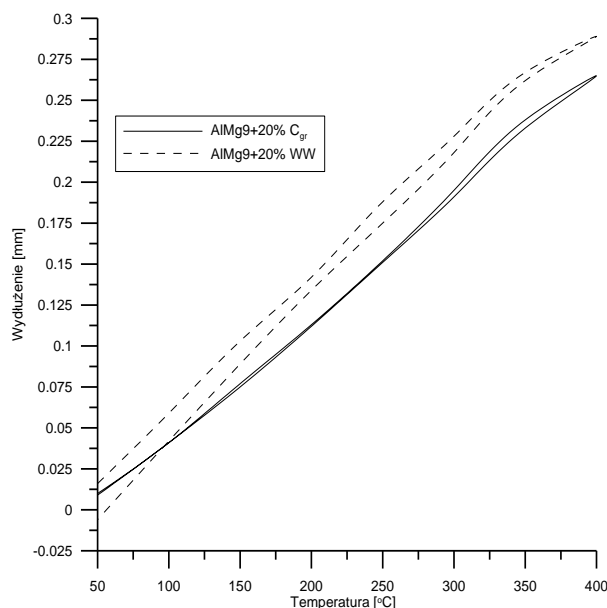
Na rysunku 3 przedstawiono krzywe nagrzewania i chłodzenia kompozytu zawierającego 10% cząstek grafitu i 10% włókien węglowych. Dylatogram ten również ujawnił zmiany wymiarowe badanych próbek. Próbkę z grafitem uległa skróceniu o 0,01 mm, próbka z włóknem węglowym czterokrotnie więcej - 0,043 mm.



Rys. 3. Dylatogramy kompozytów zawierających 10% zbrojenia  
Fig. 3. Dilatometric curve for AlMg9+10% reinforcement composites

Rysunek 4 przedstawia krzywe dylatometryczne kompozytu zawierającego 20% grafitu i kompozytu zawierającego 20% włókien węglowych. Przy takim udziale

zbrojenia skrócenie próbki z włóknem węglowym nie jest tak duże, ponieważ wynosi 0,02 mm, natomiast w próbce z grafitem nie zaobserwowano zmian wymiarowych po cyklu nagrzewania i chłodzenia.



Rys. 4. Dylatogramy kompozytów zawierających 20% zbrojenia  
Fig. 4. Dilatometric curve for AlMg9+20% reinforcement composites

Z przedstawionych powyżej krzywych dylatometrycznych obliczono ze wzoru (1) chwilowe współczynniki liniowej rozszerzalności cieplnej  $\alpha$  podczas nagrzewania. Wartości obliczonych współczynników rozszerzalności cieplnej dla stopu osnowy i kompozytów zbrojonych cząstkami grafitu podano w tabeli 1. Wartości obliczonych współczynników rozszerzalności cieplnej dla stopu osnowy i kompozytów zbrojonych włóknami węglowymi zamieszczono natomiast w tabeli 2. Graficzny obraz chwilowej rozszerzalności cieplnej badanych materiałów przedstawiono na rysunku 5.

TABELA 1. Obliczone wartości chwilowych współczynników rozszerzalności cieplnej stopu AlMg9 i kompozytów zawierających cząstki grafitu

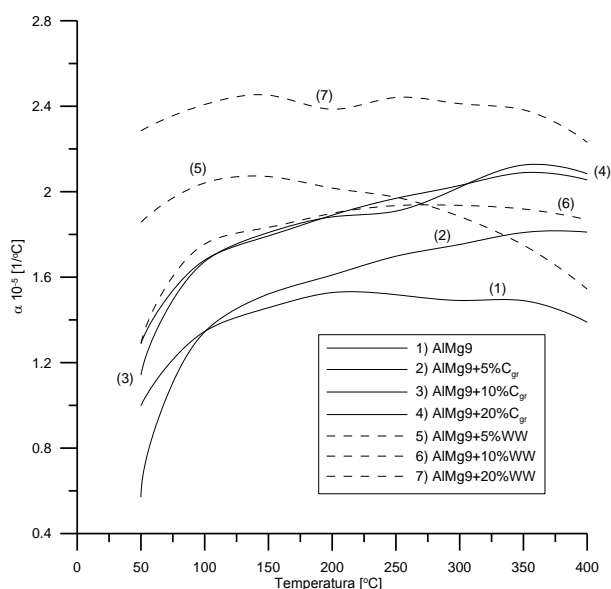
TABLE 1. Calculated values of instantaneous coefficients of thermal expansion for AlMg9 alloy and composites containing graphite particles

T, °C	$\alpha, 10^{-5} 1/^{\circ}\text{C}$			
	AlMg9	AlMg9+5% C <sub>gr</sub>	AlMg9+10% C <sub>gr</sub>	AlMg9+20% C <sub>gr</sub>
50	0,999	0,570	1,142	1,291
100	1,346	1,344	1,673	1,680
150	1,457	1,521	1,809	1,793
200	1,528	1,610	1,882	1,890
250	1,518	1,698	1,909	1,969
300	1,491	1,753	2,021	2,029
350	1,490	1,809	2,125	2,089
400	1,389	1,811	2,084	2,055

TABELA 2. Obliczone wartości chwilowych współczynników rozszerzalności cieplnej stopu AlMg9 i kompozytów zawierających cięte włókna węglowe

TABLE 2. Calculated values of instantaneous coefficients of thermal expansion for AlMg9 alloy and composites containing chopped carbon fibre

T, °C	$\alpha, 10^{-5} 1/^{\circ}\text{C}$			
	AlMg9	AlMg9+5% WW	AlMg9+10% WW	AlMg9+20% WW
50	0,999	1,857	1,289	2,285
100	1,346	2,041	1,755	2,408
150	1,457	2,071	1,833	2,452
200	1,528	2,017	1,899	2,386
250	1,518	1,974	1,935	2,441
300	1,491	1,884	1,936	2,412
350	1,490	1,750	1,919	2,383
400	1,389	1,544	1,869	2,231



Rys. 5. Chwilowe współczynniki rozszerzalności cieplnej

Fig. 5. Instantaneous coefficients of thermal expansion

Z rysunku 5 wynika, że w większości przypadków do temperatury 100°C następuje znaczny wzrost wartości współczynników rozszerzalności cieplnej. Po przekroczeniu tej temperatury dla stopu osnowy i kompozytów zbrojonych krótkim włóknem węglowym współczynnik stabilizuje się, dla kompozytu zawierającego 5% włókien nawet spada. W przypadku kompozytów zbrojonych cząstkami grafitu, po gwałtownym wzroście do temperatury 100°C, następuje spowolnienie wzrostu wartości współczynnika, do końca nagrzewania próbek współczynnik dla tych kompozytów nieznacznie rośnie. Wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej dla wszystkich kompozytów przyjmuje wyższe wartości niż dla stopu osnowy, a wraz ze wzrostem udziału zbrojenia współczynnik rośnie. W przypadku kompozytów z cząst-

kami grafitu te zmiany nie są tak duże jak w przypadku kompozytów z włóknami węglowymi. Dla kompozytu zawierającego 30% ciętych włókien węglowych współczynnik rozszerzalności cieplnej jest dwukrotnie większy niż dla stopu AlMg9.

## PODSUMOWANIE

Z reguły współczynniki rozszerzalności cieplnej materiałów stosowanych na zbrojenie metalowych kompozytów są niższe niż stopów osnowy. Dlatego też w kompozytach zbrojonych materiałem ceramicznym podczas nagrzewania osnowa rozszerza się w większym stopniu niż zbrojenie. Jeśli występują połączenia adhezyjne na granicy rozdziału faz, rozszerzanie osnowy będzie ograniczone poprzez obecność zbrojenia [6]. Zbrojenie ceramiczne powinno przeciwdziałać rozszerzaniu się osnowy. Badania przedstawione powyżej wykazały, że współczynnik rozszerzalności cieplnej dla kompozytów zbrojonych zarówno cząstkami grafitu, jak i ciętym włóknem węglowym jest wyższy niż dla stopu osnowy. Może to świadczyć o braku połączeń adhezyjnych na powierzchni rozdziału faz, w związku z tym osnowa rozszerza się mimo obecności fazy zbrojącej. Fakt ten może również świadczyć o mikroporowatości odlewów kompozytowych, której niestety trudno uniknąć podczas wytwarzania zawieszin kompozytowych. Mimo iż współczynniki rozszerzalności cieplnej kompozytów przyjmują wyższe wartości niż stop osnowy, zbrojenie wpłynęło pozytywnie na stabilizację wymiarową badanych odlewów. Kompozyty z włóknami węglowymi poprawiły stabilizację wymiarową, natomiast próbki zawierające cząstki grafitu po cyklu nagrzewania i chłodzenia nie zmieniły swoich wymiarów. Zmiany wymiarowe próbek po cyklu nagrzewania i chłodzenia są związane, jak się przypuszcza, z wydzielaniem się fazy  $\text{Al}_3\text{Mg}_5$  podczas chłodzenia stopu do temperatury otoczenia.

## LITERATURA

- [1] Poniewierski Z., Krystalizacja, struktura i właściwości siluminów, WNT, Warszawa 1986.
- [2] Górny Z., Odlewnicze stopy metali nieżelaznych, WNT, Warszawa 1992.
- [3] Konopka Z., Cisowska M., Rachwałik A., Rozszerzalność cieplna kompozytów na osnowie stopu AlMg10 z cząstkami SiC i Cgr, Kompozyty (Composites) 2002, 2, 3 113-116.
- [4] Kurzawa A., Kaczmar J.W., Janus A., Rozszerzalność cieplna materiałów kompozytowych na osnowie Al w podwyższonych temperaturach, Kompozyty (Composites) 2001, 1, 2, 167-170.
- [5] Ziencik H., Rentgenowskie badanie składu fazowego, rozszerzalności cieplnej i zdrowienia stopu FeAl16, Archiwum Nauki o Materiałach 1996, 17, 4.
- [6] Ślęziona J., Podstawy technologii kompozytów, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 1998.