



Badania termiczne odlewniczego stopu magnezu

P. Snopiński^b, M. Król^a

^a Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Technologii Procesów Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie
email: mariusz.krol@polsl.pl

^b Doktorant Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Technologii Procesów Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie
email: przemyslaw.snopiński@polsl.pl

Streszczenie: Celem wykonanych badań było określenie procesu krystalizacji oraz pomiar liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej eksperymentalnego odlewniczego stopu MCMgAl9Zn1. Proces krystalizacji odlewniczego stopu magnezu wyznaczono w wyniku analizy termiczno-derywacyjną wykonaną na symulatorze metalurgicznym UMSA (ang. Universal Metallurgical Simulator and Analyzer), natomiast pomiar liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej wyznaczono w parciu o badania dylatometryczne wykonane na dylatometrze DIL805A/D firmy BAHR.

Abstract: The aim of this study was to determine the crystallization process and the measurement of linear thermal expansion coefficient of experimental MCMgAl9Zn1 cast magnesium alloy. The crystallization process of cast magnesium alloy were performed based on the thermal analysis performed on Universal Metallurgical Simulator and Analyzer, while measuring the linear thermal expansion coefficient was determined based on the dilatometer DIL805A/D.

Keywords: analiza termiczna, badania dylatometryczne, odlewniczy stop aluminium

1. WSTĘP

W obecnych czasach stopy magnezu posiadają bardzo dobre własności mechaniczne, niską gęstość oraz charakteryzują się dobrą przewodnością elektryczną oraz cieplną. Głównie z tych powodów, stopy magnezu stosowane są m.in. w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym jak również w urządzeniach gospodarstwa domowego i biurowego. Magnez w znaczny sposób przyczynia się do zmniejszenia wagi samochodów a co za tym idzie do oszczędniejszej gospodarki paliwem pojazdów [1,2].

Analiza termiczno-derywacyjna jest najczęściej stosowaną metodą badawczą, która umożliwia wyznaczenie temperatur przemian fazowych podczas nagrzewania i/lub chłodzenia próbki. Stosuje się ją do automatycznej oceny modyfikacji stopów odlewniczych, do oceny składu chemicznego stopów aluminium i magnezu oraz stężenia węgla w żeliwach, stężenia siarki, równoważnika węgla a także współczynnika nasycenia eutektycznego SC. Na polepszenie własności użytkowych wpływa poprawnie przeprowadzona modyfikacja chemiczna oraz zastosowanie odpowiedniego chłodzenia odlewów. Dokładna znajomość wpływu szybkości stygnięcia odlewów na strukturę oraz temperatury przemian fazowych podczas krystalizacji umożliwia optymalne sterowanie procesem produkcyjnym. Uzyskana struktura odlewu bezpośrednio wpływa na własności mechaniczne i technologiczne produktów końcowych. Brak możliwości zmiany struktury odlewu, wymusza odpowiednie wykorzystanie teorii krystalizacji do sterowania procesami technologicznymi, w celu optymalizacji struktury, według konkretnych wymagań dotyczących danego elementu. Analiza ta umożliwia wyznaczenie proporcji wykrystalizowanych w stopie faz zakładając że ukryte ciepło krystalizacji jest proporcjonalne do udziału poszczególnych faz w stopie, dlatego bardzo ważna jest wiedza jak wpływa zmiana składu chemicznego stopu oraz zmiana warunków krystalizacji stopów na uzyskaną strukturę i jak te zmiany wpływają na kinetykę krystalizacji stopu [3-7].

Podstawowe parametry wyznaczone podczas analizy, bazując na charakterystycznych punktach krzywej derywacyjnej, odzwierciedlają efekty cieplne zachodzące w stopie podczas krystalizacji. Uzależnione one są od składu chemicznego, szybkości chłodzenia, szybkości generowania ciepła krystalizacji i temperatury ciekłego metalu. Parametry te więc mają największy wpływ na uzyskaną strukturę końcową stopu [6].

Znajomość kinetyki i dynamiki procesów cieplnych zachodzących podczas krystalizacji stopu umożliwia opracowanie zależności statystycznych pomiędzy charakterystycznymi wielkościami krzywych ATD, a składem chemicznym, szybkością chłodzenia stopu, parametrami opisującymi strukturę stopu oraz własnościami mechanicznymi [1-5,7].

2. MATERIAŁ ORAZ PRZEBIEG BADAŃ

Analizę termiczno-derywacyjną wykonano na eksperymentalnym odlewniczym stopie magnezu, którego skład chemiczny został przedstawiony w tabelicy 1. Stop został przygotowany w indukcyjnym piecu tyglowym, z wykorzystaniem kąpieli ochronnej Flux 12, wyposażonym w dwa filtry ceramiczne w temperaturze topnienia odpowiedniej dla wytwarzanego materiału $750 \pm 10^\circ\text{C}$. Dla poprawy jakości powierzchni metalu zastosowano warstwę ochronną Alkon M62. Materiał odlano do matryc ze spoiwem bentonitowym ze względu na korzystne własności sorpcyjne oraz formowany w kształcie płyt o wymiarach $250 \times 150 \times 25 \text{ mm}$. Z wytopu wykonano 4 płytki o średniej masie 1,68 kg, które poddano obróbce mechanicznej w celu przygotowania próbek do termoanalizy na urządzeniu UMSA (rys. 1). Wymiary próbek do termoanalizy przedstawiono na rysunku 2.

Tablica 1. Skład chemiczny badanego stopu MCMgAl9Zn1

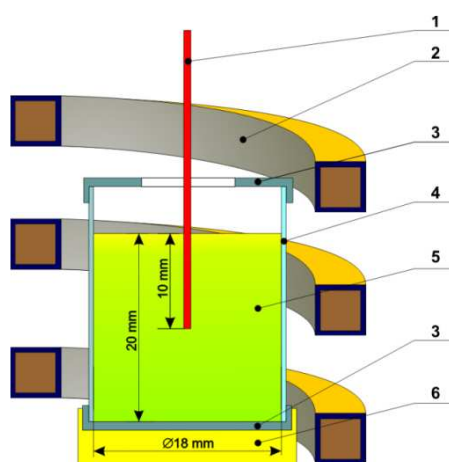
Table 1. Chemical composition of MCMgAl9Zn1 cast magnesium alloy

Al	Zn	Mn	Si	Fe	Mg	Rest
9.09	0.77	0.21	0.037	0.011	89.79	0.0915



Rysunek 1. Aparatura UMSA: 1 - komora badawcza, 2 - komputer sterujący, 3 - generator wysokiej częstotliwości, 4 - moduł sterujący przepływem gazu

Figure 1. UMSA device: (1) sample chamber, (2) supervisory computer, (3) temperature control, (4) gas flow control



Rysunek 2. Schemat próbki do termooanalizy: 1 - termopara, 2 - cewka indukcyjna wraz z dyszami chłodzącymi, 3 - izolacja termiczna, 4 - folia stalowa, 5 - badany materiał, 6 - ceramiczna podstawa

Figure 2. Schematic of the UMSA Thermal Analysis Platform experimental set-up: 1 - low thermal mass thermocouple, 2 - heating and cooling coil, 3 - thermal insulation, 4 - steel foil, 5 - test sample, 6 - ceramic base

W celu określenia procesu krystalizacji odlewniczego stopu magnezu analizowane próbki były nagrzane indukcyjnie do temperatury $700 \pm 1^\circ\text{C}$ poprzez wzbudnik 2 (rys. 2) zasilany z generatora indukcyjnego urządzenia 3 (rys. 1) o mocy 5kW. Zabieg przetapiania wykonano w szczelnie zamkniętej komorze, w atmosferze argonu jako gazu ochronnego o natężeniu przepływu 2,4 l/min. W celu osiągnięcia odpowiedniej szybkości chłodzenia, próbki chłodzono wykorzystując argon podawany przez dysze umieszczone w wzbudniku 2 (rys. 2). Przepływ gazu dobrano eksperymentalnie i zastosowano do całego eksperymentu.

Do pomiaru temperatury wykorzystano termopary typu K firmy Omega Engineering. Dla każdej szybkości chłodzenia wykorzystano jedną termoparę. Próbę powtórzono pięć razy.

Pomiar zmian temperatury próbki $T=f(t)$ oraz szybkości chłodzenia $dT/dt=f'(t)$ stopu dokonano w odstępach czasu $dt=0,2$ s za pomocą wbudowanego w urządzenie UMSA przetwornika. Po rejestracji krzywej stygnięcia $T=f(t)$ oraz zapisie informacji o mocy generatora i przepływie gazu ochronnego, dane poddano dalszej obróbce tj. różniczkowaniu i wygładzeniu w celu wyznaczenia krzywej różniczkowej. Do obróbki danych wykorzystano program OriginLab Pro 8 i zastosowano filtr wygładzający Savitzky-Golay.

Badania rozszerzalności cieplnej odlewniczego stopu MCMgAl9Zn1 zostały przeprowadzone za pomocą dylatometru DIL805A/D firmy BAHR. W celu określenia współczynnika rozszerzalności liniowej próbki poddano procesowi nagrzewania i chłodzenia w atmosferze ochronnej argonu. Umieszczone w dylatometrze próbki walcowe o długości 10 mm i średnicy 4 mm, nagrzewano z temperatury otoczenia do temperatury 370°C, a następnie chłodzono do temperatury otoczenia. Szybkość nagrzewania wyniosła 5°C/s z kolei szybkość chłodzenia wyniosła 2°C/s. Na podstawie krzywych dylatometrycznych określono zmiany w wymiarach poszczególnych próbek po cyklu nagrzewania i chłodzenia. Wartości współczynników liniowej rozszerzalności cieplnej zostały określone ze wzoru :

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

gdzie:

$\alpha_{\Delta T}$ - współczynnik rozszerzalności liniowej,

Δl - wydłużenie bezwzględne,

l_0 - długość początkowa próbki,

ΔT - różnica temperatury.

3. WYNIKI BADAŃ

Na podstawie analizy ATD wyznaczono charakterystyczne punkty opisujące zjawiska cieplne zachodzące podczas krystalizacji stopu MCMgAl9Zn1, definiujące wartości temperatury i czasu odczytane z krzywych analizy termiczno-derywacyjnej. Przykładową krzywą analizy termiczno-derywacyjnej wraz z zaznaczonymi punktami opisującymi zjawiska cieplne przedstawiono na rysunkach 3 i 4 oraz w tabelicy 2. Punkty charakterystyczne przemian zachodzących podczas krystalizacji określono, jako punkty stycznej w miejscu przecięcia krzywej z krzywą bazową. Oznaczenie przyjętych punktów przedstawiono w tabelicy 2 a skrócony sposób ich wyznaczania w tabelicy 3.

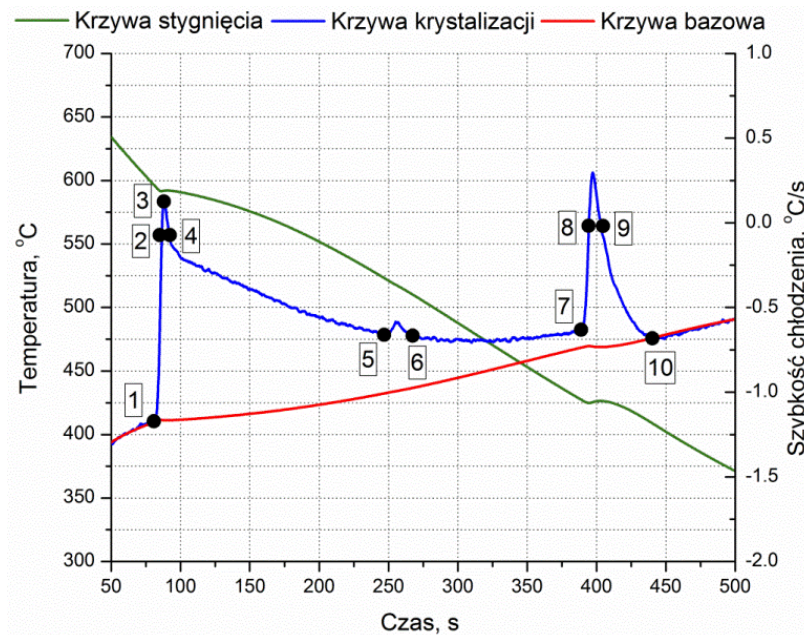
Rzutując wyznaczone punkty na krzywą stygnięcia, a następnie na oś rzędnych i odciętych wyznaczono odpowiednio temperaturę i czasy tworzenia oraz wydzielania się poszczególnych faz podczas krystalizacji. Dodatkowo, na podstawie wybranych wartości charakteryzujących krzywą różniczkową, obliczono ukryte ciepło krystalizacji poszczególnych faz.

Założono, że pojemność cieplna - $c_p(t)$, krystalizacji stopu jest funkcją czasu, a więc zależna jest od udziału fazy stałej, pojemności cieplnej w stanie ciekłym c_{pLiq} oraz pojemności cieplnej w stanie stałym c_{pSol} . Pojemność cieplną stopu w czasie t obliczono na podstawie zależności:

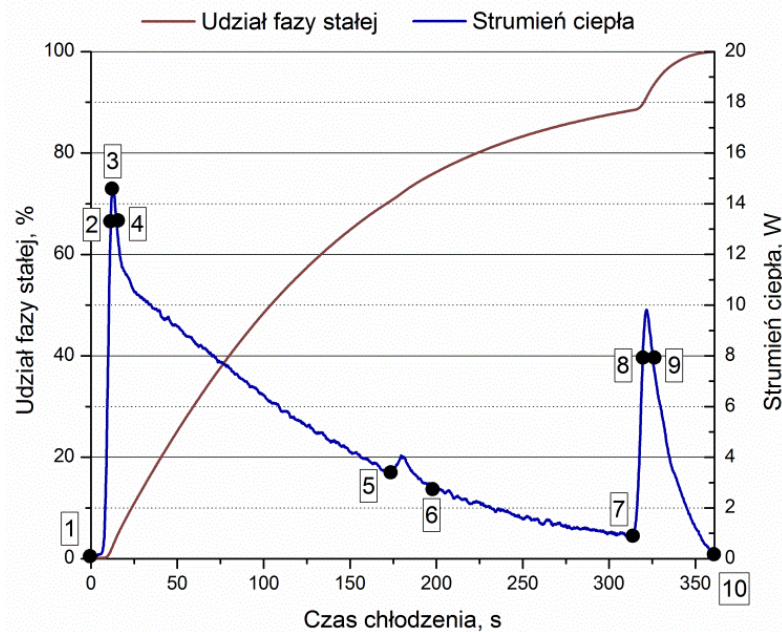
$$c_p(t) = c_{pSol} \cdot \int_{t_N}^t f_s(t) dt + c_{pLiq} \cdot \left(1 - \int_{t_N}^t f_s(t) dt \right) \quad (2)$$

gdzie:

f_s - udział fazy stałej, zakładając, że dla $f_s(t \leq t_N) = 0$ oraz $f_s(t \geq t_N) = 1$.



Rysunek 3. Reprezentatywna krzywa krystalizacji odlewniczego stopu MCMgAl9Zn1
 Figure 3. Representative thermo-derivative curve of MCMgAl9Zn1 magnesium alloy



Rysunek 4. Reprezentatywna krzywa ilustrująca zmiany przepływu ciepła oraz udziału fazy stałej odlewniczego stopu magnezu MCMgAl9Zn1
 Figure 4. Representative curves illustrate changes of heat flux and fraction solid of MCMgAl9Zn1

Tablica 2. Punkty charakterystyczne wyznaczone z analizy termiczno-derywacyjnej stopu MCMgAl9Zn1

Table 2. Characteristic points obtained from thermal-derivative analysis of MCMgAl9Zn1 cast magnesium alloy

Punkt	Temperatura	Opis
I	T_N	Zarodkowanie fazy α (temperatura likwidus)
II	T_{Dmin}	Wzrost fazy α
III	T_{DKP}	Koherencja fazy α
IV	T_G	Ustalony wzrost fazy α
V	$T_{(Mg+Si+Al+Mn)}$	Krystalizacja fazy α oraz fazy Mg_2Si oraz fazy zawierającej Al i Mn
VI	$T_{(Mg+Si+Al+Mn)f}$	Koniec krystalizacji faz Mg_2Si oraz fazy zawierającej Al i Mn
VII	$T_{E(Mg+Al)N}$	Zarodkowanie eutektyki $\alpha+\gamma(Mg_{17}Al_{12})$
VIII	$T_{E(Mg+Al)min}$	Wzrost eutektyki $\alpha+\gamma(Mg_{17}Al_{12})$
IX	$T_{E(Mg+Al)G}$	Ustalony wzrost eutektyki $\alpha+\gamma(Mg_{17}Al_{12})$
X	T_{sol}	Koniec krystalizacji stopu (temperatura solidus)

Tablica 3. Metodyka wyznaczania charakterystycznych punktów z krzywej termiczno-derywacyjnej.

Table 3. Methods of determining the characteristic points of thermo-derivative curve

Punkt	Opis	Sposób wyznaczenia charakterystycznych
I	Początek zarodkowania fazy α	Punkt przecięcia stycznej poprowadzonej do prostego odcinka krzywej krystalizacji z krzywą bazową.
II	Wzrost kryształów fazy α w momencie osiągnięcia wartości krytycznej	Wartość pierwszej pochodnej równa zero.
III	Koherencja dendrytów fazy α	Osiągnięcie wartości maksymalnej przez pierwszą pochodną
IV	Ustalony wzrost fazy α	Pierwsza pochodna ponownie osiąga wartość zero.
VIII	Rozrost zarodków fazy γ w momencie osiągnięcia wartości krytycznej	Pierwsza pochodna osiąga wartość zero
IX	Ustalony wzrost eutektyki $\alpha+\gamma(Mg_{17}Al_{12})$	Wartość pierwszej pochodnej krzywej stygnięcia osiąga po raz kolejny wartość zero.
X	Koniec krystalizacji stopu	Krzywa krystalizacji pokrywa się z krzywą bazową.

Pojemność cieplną w stanie ciekłym c_{pLiq} oraz pojemność cieplną w stanie stałym c_{pSol} obliczono na podstawie składów chemicznych przedstawionych w tabelicy 1 z wykorzystaniem programu Thermo-Calc Software.

Całkowite ciepło ukryte krystalizacji badanych stopów obliczono na podstawie zależności:

$$Q = c_p \cdot m \cdot \int_{t_N}^{t_{sol}} \left[\frac{dT}{dt} - \left(\frac{dT}{dt} \right)_c \right] \quad (3)$$

gdzie:

c_p - pojemność cieplna stopu,
 m - masa próbki, kg.

Reprezentatywną krzywą stygnięcia i krystalizacji stopu Mg-Al-Zn przedstawiono na rysunku 3 i 4. Analizując przebieg krystalizacji stopów, w oparciu o uzyskane krzywe, stwierdzono że w temperaturze T_N której wartość wyniosła $597,97^\circ\text{C}$ rozpoczyna się proces zarodkowania fazy α . Efekt ten na krzywej krystalizacji objawia się przegięciem w punkcie I oraz chwilowym spadkiem szybkości chłodzenia. Hamowanie szybkości stygnięcia pozostałej cieczy spowodowane jest poprzez ciepło dostarczone przez zarodki fazy α , które jest mniejsze niż ciepło oddawane do otoczenia przez stygnący ciekły metal. Proces ten kończy się w punkcie II, gdzie temperatura krystalizacji osiąga wartość minimalną - $T_{Dmin}=592,29^\circ\text{C}$, w której rozpoczyna się wzrost kryształów fazy α . W punkcie tym, wartość pochodnej po raz pierwszy przyjmuje wartość zero. Chłodzony stop, w wyniku wydzielania się ciepła krystalizacji, podgrzewa pozostałą ciecz do temperatury $T_{DKP}=592,65^\circ\text{C}$ (punkt III). Dalszy wzrost kryształów powoduje podwyższenie temperatury pozostałej cieczy do maksymalnej temperatury krystalizacji fazy α - T_G wynoszącej $592,91^\circ\text{C}$ (punkt IV). Dalsze ochładzanie stopu powoduje rozpoczęcie krystalizacji faz bogatych w krzem, aluminium i mangan, które wydzielają dodatkowe ciepło, co objawia się na krzywej krystalizacji wyraźnymi efektami cieplnymi określonymi jako $T_{(Mg+Si+Al+Mn)}$ i $T_{(Mg+Si+Al+Mn)f}$ (punkt V i VI). Wartości tych temperatur wyniosły odpowiednio $515,8^\circ\text{C}$ i $503,07^\circ\text{C}$. W wyniku dalszego ochładzania stopu do temperatury $428,78^\circ\text{C}$ po osiągnięciu $T_{E(Mg+Al)N}$ następuje zarodkowanie eutektyki $\alpha + \gamma$ (punkt VII). Chłodzony stop osiąga temperaturę $T_{E(Mg+Al)min}=425,76^\circ\text{C}$ (punkt VIII), po czym temperatura ta podwyższa się do maksymalnej temperatury krystalizacji eutektyki $T_{E(Mg+Al)G}$ wynoszącej $427,25^\circ\text{C}$ (punkt IX). Krystalizacja stopu kończy się w punkcie X, gdzie osiąga wartość T_{sol} równą $413,01^\circ\text{C}$. Z uwagi na specyfikę analizowanych wyników, tj. nieznaczne różnice w wartościach temperatur oraz w celu uchwycenia subtelnych różnic pomiarowych odczytywanych przy użyciu termopary typu K i systemu analizującego posłużono się zapisem wartości z dokładnością do dwóch miejsc po przecinku.

Na podstawie analizy termiczno-derywacyjnej wyznaczono ilość ciepła generowanego podczas krystalizacji stopu przez poszczególne składniki strukturalne (rys. 4 oraz tab. 5).

Wykorzystując dane otrzymane w wyniku badania dylatometrycznego wyznaczono współczynnik rozszerzalności cieplnej α a także określono skrócenie s próbki po cyklu nagrzewania i chłodzenia. Wartości wydłużenia bezwzględnego, skrócenia próbki oraz długość początkową przedstawiono w tabelicy 6. Na podstawie analizy przebiegu krzywej nagrzewania i chłodzenia stopu MCMgAl9Zn1 przedstawionego na rysunku 5 stwierdzono iż, próbka charakteryzuje się liniowym wzrostem wydłużenia w funkcji temperatury. Jednak dokładniejsza analiza krzywej nagrzewania oraz chłodzenia wykazała, że po przekroczeniu temperatury 225°C następuje wzrost kąta nachylenia krzywej względem osi x układu

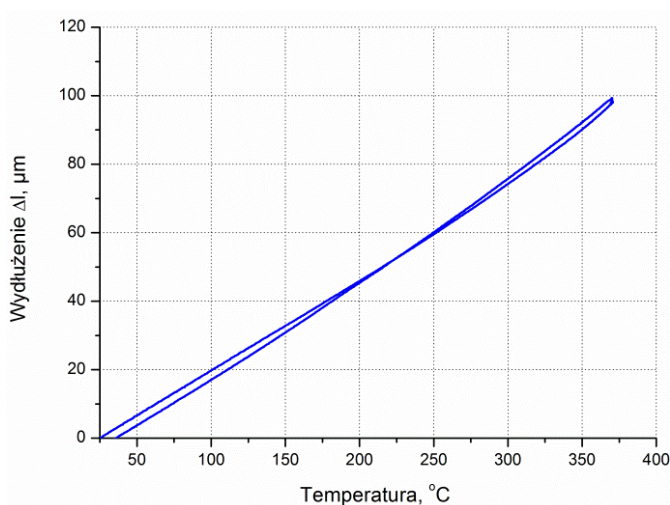
współrzędnych, co może wpłynąć na zmianę wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej powyżej tej temperatury.

Tablica 4. Ukryte ciepło krystalizacji wydzielane przez krystalizujące fazy i jego udział procentowy w ogólnym cieple krystalizacji stopu MCMgAl9Zn1 chłodzonego z szybkością 0,6 °C/s

Table 4. Latent heat of crystallization emitted during solidification and its participation in general latent heat of MCMgAl9Zn1 during solidification at cooling rate of 0.6 °C/s

Pojemność cieplna cieczy C_{pL} , J/g·°C	Pojemność cieplna w stanie stałym C_{pS} , J/g·°C		Masa próbki, g
1,202	1,002		9,37
Reakcja	Ukryte ciepło krystalizacji		Udział procentowy, %
	Próbki, J	Jednostkowej masy próbki, J/g	
$L \rightarrow \alpha(\text{Mg})$	1180,37	125,97	72,56
$L \rightarrow \alpha(\text{Mg}) + \text{Mg}_2\text{Si} + (\text{Al} + \text{Mn})$	273,84	29,22	16,83
$L \rightarrow \alpha(\text{Mg}) + \gamma(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$	172,39	18,39	10,59
Razem	1626,6	173,59	100

Analiza danych wykonana w programie OriginLab Pro 8 umożliwiła wyznaczenie dwóch równań liniowych krzywych opisujących badaną zależność w zakresie temperatury (25-225°C) oraz (225-375°C) (rys. 6). Na podstawie danych można przypuszczać, iż zmiana kąta nachylenia krzywej w zakresie temperatury 225-375°C spowodowana jest wzrostem rozpuszczania fazy $\gamma(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ w osnowie. Po zakończeniu cyklu nagrzewania i chłodzenia badana próbka uległa skróceniu o 0,02908 mm, co prawdopodobnie spowodowane jest powstaniem naprężeń strukturalnych zachodzących w wyniku przemian fazowych oraz zmianą ich udziału objętościowego. Można zaobserwować, iż wartość liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej nie ulega zmianę w znaczący sposób w zakresie temperatury (50-200°C), następnie powyżej temperatury 200°C następuje jego wzrost.

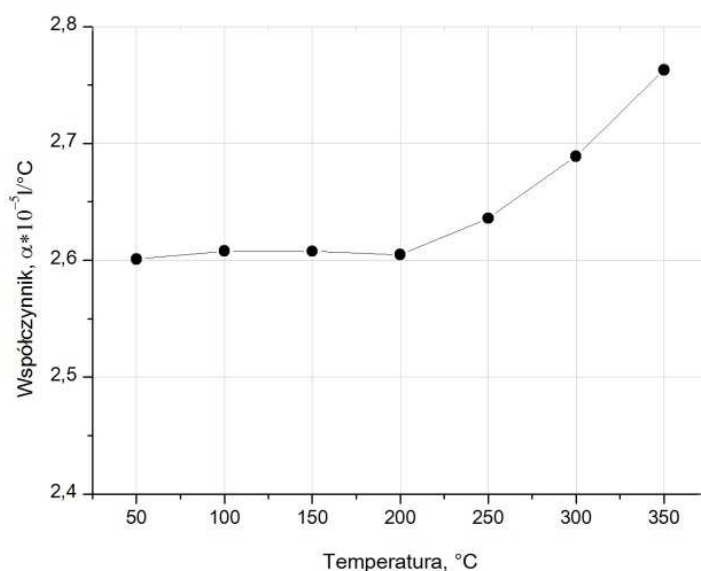


Rysunek 5. Dylatogram odlewniczego stopu MCMgAl9Zn1

Figure 5. Thermal expansion curve of MCMgAl9Zn cast magnesium alloy

Tablica 5. Dane pomiarowe i obliczeniowe rozszerzalności cieplnej
 Table 5. List of measured and calculated values from thermal expansion curve

T °C	MCMgAl9Zn1			
	Δl , mm	$\alpha \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$	L_0	s
			mm	
50	0,0667442	2,60098	10,03	0,02908
100	0,1996277	2,63496		
150	0,3282246	2,60783		
200	0,4583468	2,60482		
250	0,5958588	2,63583		
300	0,7425749	2,68892		
350	0,9014409	2,76294		



Rysunek 6. Wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej stopu MCMgAl9Zn1
 Figure 6. Coefficient of linear thermal expansion of MCMgAl9Zn1 alloy

4. WNIOSKI

Badania wykonane na symulatorze procesów metalurgicznych wykazały, iż analiza termiczna jest bardzo wydajnym narzędziem do wyznaczania danych dotyczących przemian zachodzących w trakcie nagrzewania i chłodzenia oraz a także wyznaczenia temperatur likwidus i solidus. Zastosowanie analizy termiczno-derywacyjnej umożliwiło lepsze zrozumienie procesów zachodzących podczas krystalizacji. Dane zarejestrowane w trakcie pomiarów umożliwiły wyznaczenie krzywej krystalizacji, charakterystycznych punktów przemian zachodzących w trakcie procesu oraz wyznaczenie ukrytego ciepła krystalizacji.

Na podstawie zarejestrowanych dylatogramów wykazano, że stop MCMgAl9Zn1 charakteryzuje się liniowym wzrostem wydłużenia w funkcji temperatury co wskazuje na to iż w stopie tym nie zachodzą przemiany fazowe w badanym zakresie temperatury. Analiza danych pozwoliła na wyznaczenie współczynnika rozszerzalności cieplnej, skrócenia oraz wartości wydłużenia bezwzględnego próbki.

PODZIĘKOWANIA

Mariusz Król jest stypendystą projektu nr POKL.04.01.01-00-003/09-00: „Otwarcie i rozwój studiów inżynierskich i doktoranckich w zakresie nanotechnologii i nauki o materiałach” (INFONANO) w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego. Kierownikiem projektu jest prof. dr hab. inż. L.A. Dobrzański.



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



LITERATURA

1. L.A. Dobrzański, M. Król, T. Tański, Effect of cooling rate and aluminium contents on the Mg-Al-Zn alloys structure and mechanical properties, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 43/2 (2010) 613-633.
2. L.A. Dobrzański, M. Król, T. Tański, R. Maniara, Thermal analysis of the MCMgAl9Zn1 magnesium alloy, *Archives of Materials Science*, 114 (2008) 113-116.
3. L.A. Dobrzański, M. Król, T. Tański, R. Maniara, Effect of cooling rate and solidification behavior of magnesium alloys, *Archives of Computational Materials Science and Surface Engineering*, 1/1 (2009) 21-24.
4. L.A. Dobrzański, M. Król, Thermal and mechanical characteristics of cast Mg-Al-Zn alloy, *Archives of Foundry Engineering*, 10/1 (2010) 27-30.
5. L.A. Dobrzański, T. Tański, J. Domagała, M. Król, S. Malara, A. Klimpel, Structure and properties of the Mg alloys in as-cast state and after heat and laser treatment, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 1/1 (2008) 123-147.
6. Y. Guangyin, L. Manping, D. Wenjiang, A. Inoue, Mechanical properties and microstructure of Mg-Al- Zn-Si-base alloy, *Materials Transactions*, 44/4 (2003) 458-462.
7. L.A. Dobrzański, M. Król, Thermal and structure analysis of the MA MgAl6Zn3 magnesium alloy, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 46/2 (2011) 189-195.