

# OCENA WPŁYWU SKŁADU CHEMICZNEGO WYBRANYCH STOPÓW NA WARTOŚĆ TEMPERATUR W PROCESIE KRYSTALIZACJI Z WYKORZYSTANIEM METODY ATD

Roman KIELEC, Kamil LEKSYCKI

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wpływ składu chemicznego wybranych stopów siluminów z grupy AlSi9Cu (wg normy EN 1706:2011) na wartość temperatur charakteryzujących proces krystalizacji. Do uzyskania wybranych parametrów (charakterystyczne temperatury) zastosowano analizę termiczno-derywacyjną. W oparciu o uzyskane pomiary dokonano porównania wyników oraz wyciągnięto wnioski.

**Słowa kluczowe:** odlewnictwo, siluminy, krystalizacja, metoda ATD

## 1. Wstęp

Uzyskanie odlewu, który będzie spełniał założone wymagania, uzależnione jest od poprawności działań na etapie projektowania procesu technologicznego oraz jego realizacji. Jakość odlewów sprawdza się na wszystkich etapach powstawania, aż do uzyskania wyrobu ostatecznego. W nowoczesnych odlewniach projektowanie procesu wykonuje się za pomocą numerycznych symulacji zalewania formy i krzepnięcia odlewu. Symulacja pozwala między innymi, na wcześniejsze określenie miejsc powstawania wad skurczowych z powodu nieodpowiedniego zasilania odlewu. Symulacja wypełniania formy pozwala przewidzieć powstawanie wad typu „niedolew” z powodu niewłaściwego układu wlewowego.

Skuteczne wykorzystanie programów symulacyjnych możliwe jest tylko, gdy wprowadzi się do nich odpowiednie dane (wartość współczynników formy i odlewu). Dane te można uzyskać drogą odpowiednio przeprowadzonych eksperymentów.

W pracy przedstawiono wpływ składu chemicznego wybranych stopów AlSi13.5Cu1Fe0.8 oraz AlSi13.5Cu1Fe0.8Mn0.55 na wartość temperatur charakteryzujących proces krystalizacji. Badanie procesu krystalizacji wykonano wykorzystując metodę ATD. Metoda ta pozwala na ustalenie w procesie ciągłego chłodzenia temperatur przemian fazowych. Do przeprowadzenia eksperymentów wykorzystano stanowisko do analizy termiczno-derywacyjnej opracowane na Uniwersytecie Zielonogórskim.

## 2. Wprowadzenie do metodyki przeprowadzonych badań

### 2.1. Odlewnictwo

Odlewnictwo to dział technologii metali obejmujący wytwarzanie przedmiotów (odlewów) przez wypełnienie odpowiednio przygotowanych form ciekłym metalem [1]. W zależności od rodzajów tworzywa, z którego wykonuje się odlew, odlewnictwo dzielimy na: odlewnictwo żeliwa, staliwa, metali nieżelaznych, tworzyw niemetalowych.

Forma odlewnicza jest to zespół elementów, które po złożeniu tworzą wnękę formy odlewniczej o kształtach odpowiadających kształtom odlewu [1]. W odlewnictwie stosuje się formy nietrwałe (jednorazowe), półtrwałe (grafitowe) oraz trwałe (metalowe). Formy nietrwałe po zalaniu i zakrzepnięciu metalu nie nadają się do ponownego użycia, ponieważ ulegają zniszczeniu podczas usuwania odlewu [1]. Za pomocą form półtrwałych możliwe jest wykonanie od kilku do kilkuset odlewów, lecz należy mieć na uwadze, iż w ciągu procesu zalewania ciekłym metalem możliwe jest uszkodzenie wnęki formy, które można naprawić. Formy z metalu nie ulegają zniszczeniu, można w nich wykonać nawet kilkadziesiąt tysięcy odlewów [1].

Do badań przedstawionych w artykule wykorzystano formę nietrwałą (jednorazową) skorupową.

## **2.2. Fazy powstawania odlewu w formie**

W czasie powstawania odlewu występuje cały szereg różnych zjawisk decydujących o jego jakości. Należy je zrozumieć, aby bezbłędnie zaprojektować proces technologiczny. Wykonanie przedmiotów metalowych w procesie odlewniczym polega na [1]: wprowadzeniu ciekłego metalu do wnętrza formy odtwarzającej żądany kształt odlewu, a następnie zakrzepnięciu metalu, wskutek czego powstaje przedmiot o kształcie odpowiadającym wnęce formy.

W świetle powyższego można mówić o dwóch podstawowych zjawiskach: przepływie metalu we wnękę formy oraz o krzepnięciu metalu we wnękę formy. Obu tym zjawiskom fizycznym towarzyszy zjawisko wymiany ciepła w układzie metal – forma.

W przedstawionym badaniu rejestrowano wymianę ciepła metal-forma przy użyciu stanowiska do analizy termiczno-derywacyjnej.

## **2.3. Zjawisko krystalizacji**

Krystalizacja jest procesem krzepnięcia, czyli przejścia fazy ciekłej w stałą, któremu towarzyszy tworzenie struktury krystalicznej, charakteryzującej się uporządkowany rozkładem atomów w przestrzeni [2]. Przemiana taka może zaistnieć tylko wtedy, gdy wystąpi siła napędowa. W procesie krystalizacji, jak również we wszystkich fizycznych procesach samorzutnych siłą napędową jest dążność do osiągnięcia minimum energii. Siła napędowa do realizacji krystalizacji jest niezbędna, ponieważ konieczne jest istnienie drogi, po której ten proces może się dokonać. Dlatego też od wartości siły napędowej oraz metody realizacji procesu zależna jest szybkość przemiany ze stanu ciekłego w stały.

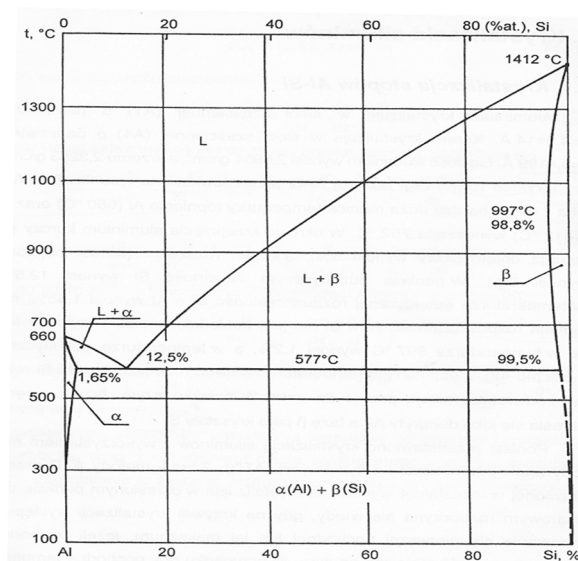
W zależności od warunków odprowadzenia ciepła z układu można wyróżnić krystalizację kierunkową lub objętościową [2]. Krystalizacja kierunkowa (frontalna, sferowa czy warstwowa) opiera się na przesuwanie się ciągłego frontu krystalizacji z jednego punktu do drugiego. W wyniku tej krystalizacji tworzą się kryształy słupkowe lub kolumnowe, wydłużone w jednym kierunku, tym samym co kierunek odprowadzania ciepła [2].

W trakcie krystalizacji objętościowej kryształy powstają w różnych miejscach, tworząc nieciągły front krystalizacji. Kształt kryształów podczas procesu krystalizacji takiego typu nazywany jest równoosiowym i jest zbliżony do kulistego.

W badaniu przebieg procesu krystalizacji rejestrowano w postaci temperaturowej, dzięki czemu możliwe było porównanie przebiegów dla wybranych do analizy stopów.

### 3. Charakterystyka siluminów

Siluminy to stopy aluminium z krzemem oraz innymi dodatkami takimi jak: miedź, magnez, mangan czy nikiel, są najczęściej wyróżniającymi się oraz najczęściej stosowanymi stopami aluminium. Struktura, podział oraz właściwości siluminów wynikają z cech układu równowagi fazowej Al-Si (rys.3.1)



Rys. 3.1. Wykres równowagi fazowej Al-Si [3]

Układ równowagi Al-Si jest typem układu podwójnego z ograniczoną rozpuszczalnością składników w stanie stałym i eutektyką [4]. Z wykresu równowagi fazowej Al-Si wynika duża różnica pomiędzy temperaturami topnienia obu pierwiastków stopowych. W przypadku aluminium wynosi ona 660 °C, zaś krzemu jest równa 1412 °C. W czasie krzepnięcia aluminium ulega skurczowi objętościowemu wynoszącemu ok. 6%, natomiast krzem zwiększa swoją objętość o 8%. Rozpuszczalność krzemu w aluminium jest na poziomie 1,65% w temperaturze eutektycznej, zaś rozpuszczalności aluminium w krzemie nie można jednoznacznie określić. Uznaje się, że w temperaturze 997 °C jest równa 1,2%, natomiast w temperaturze eutektycznej 0,5%. Wraz ze spadkiem temperatury, rozpuszczalność krzemu w aluminium jest bliska zeru i dokładnie tak samo jest w przypadku rozpuszczalności aluminium w krzemie. W związku z tym, fazę  $\alpha$  często określa się jako dendryty aluminium, a fazę  $\beta$  jako kryształy krzemu [4].

Biorąc pod uwagę udział procentowy krzemu siluminy można podzielić na:

- podeutektyczne (4÷10% Si),
- okołoeutektyczne (10÷13% Si),
- nadeutektyczne (17÷26% Si).

Do badania wybrano stopy  $AlSi13.5Cu1Fe0.8$  oraz  $AlSi13.5Cu1Fe0.8Mn0.55$ , należące do grupy siluminów okołoeutektycznych (10÷13% krzemu). Posiadają one bardzo dobre właściwości odlewnicze: niewielki skurcz, niewielki współczynnik rozszerzalności cieplnej oraz małą tendencję do pękania. Charakteryzuje je niewielki skurcz liniowy (ok. 1,15%)

w okresie krystalizacji, co zmniejsza możliwość powstawania defektów skurczowych. Dla odlewów wykonanych z tych stopów nie stosuje się obróbki cieplnej, lecz dla poprawienia właściwości plastycznych, jak i wytrzymałości na rozciąganie stosuje się czasami przesycanie. Siluminy są odporne na korozję i mają zastosowanie w przemyśle lotniczym, okrętowym, a także motoryzacyjnym [5, 6, 7].

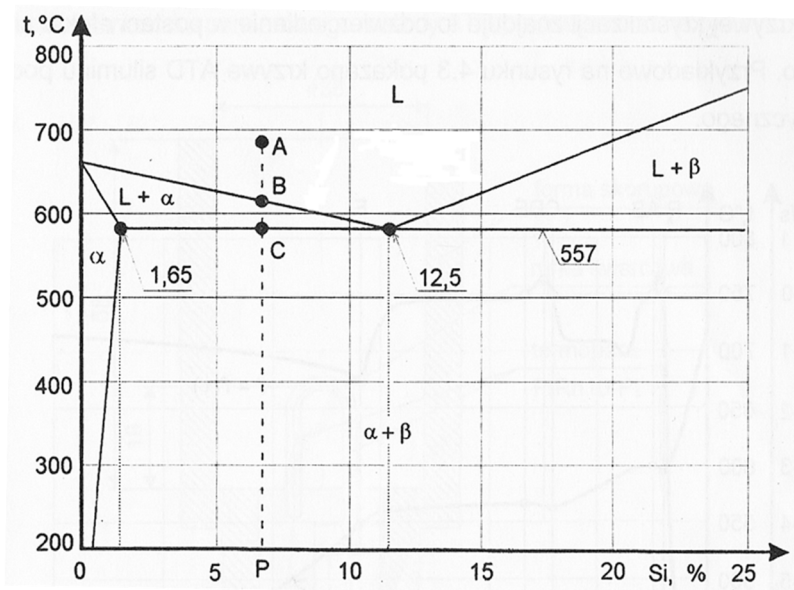
#### 4. Metodyka badań

##### 4.1. Badanie procesu krystalizacji metodą ATD

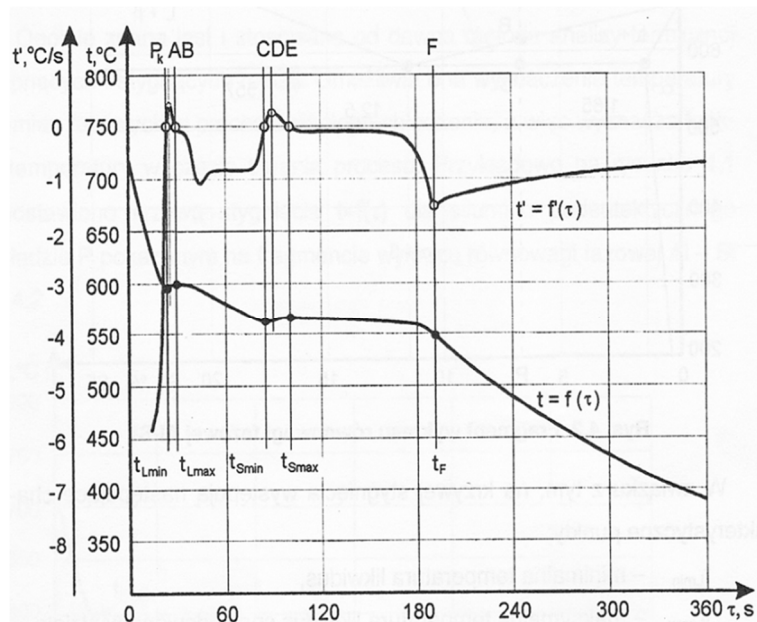
Jedną z bardziej znanych i często stosowanych metod badania procesu krystalizacji jest metoda analizy termicznej – derywacyjnej (ATD). Pozwala ona w trakcie procesu ciągłego chłodzenia na ustalenie temperatur przemian fazowych, co poniżej przedstawiono na przykładzie siluminu podeutektycznego (rys. 4.1).

Analiza termiczna i derywacyjna wykonywana jest przeważnie w próbniku ATD-10 przy użyciu aparatu Crystaldigraph, który opracowany został pod kierunkiem S. Jury [8]. W próbniku tym termoelement znajduje się w środku.

Stygnięcie siluminu przebiega od stanu ciekłego L (punkt A) do linii likwidus (punkt B), czyli początku krystalizacji fazy  $\alpha$ , a następnie do punktu C, tj. początku krystalizacji eutektyki  $\alpha+\beta$  [3]. Krzepnięcie w temperaturze eutektycznej trwa, aż do całkowitej utraty cieczy eutektycznej (rys. 4.2.).



Rys. 4.1. Fragment układu równowagi fazowej stop Al – Si [3]

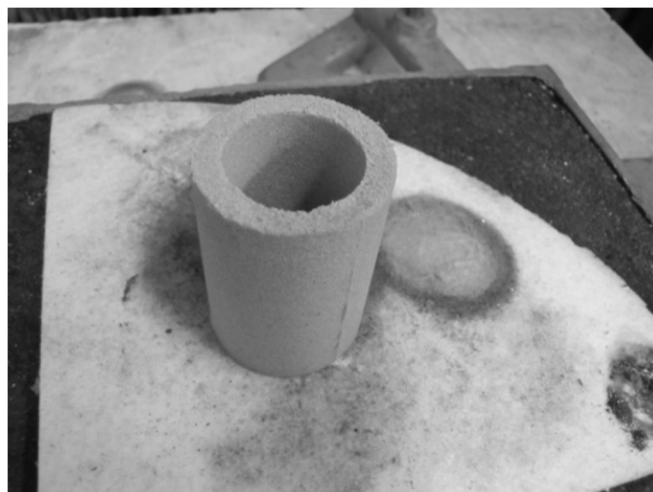


Rys. 4.2. Reprezentatywne krzywe ATD siluminu podeutektycznego [3]

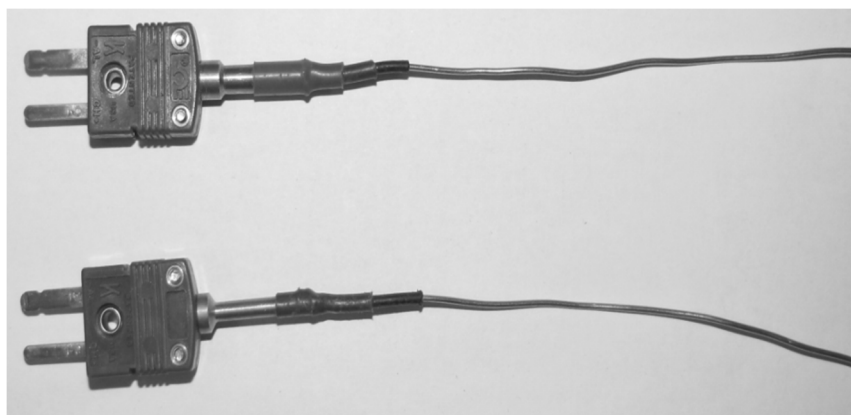
#### 4.2. Analiza termiczno-derywacyjna

Analiza termiczno – derywacyjną przeprowadzano w próbniku wykonanym z masy skorupowej (piasek cyrkonowy otaczany żywicą) o wymiarach  $\phi 30 \times 40mm$  (rys. 4.3), do którego wlewano ciekły metal. Próbник zalewano metalem o temperaturze  $800\text{ }^{\circ}C$ . Temperaturę rejestrowano przy użyciu termoelementów płaszczowych  $\phi 1mm$  typu  $K$  z nieosłoniętą spoiną pomiarową (rys. 4.4), a pomiar trwał 720 s.

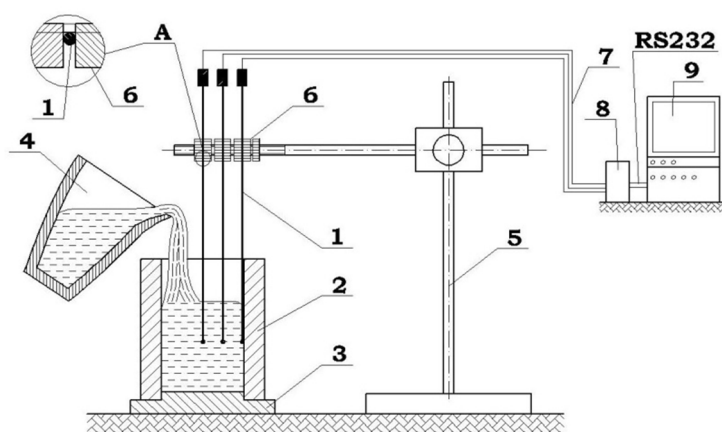
Schemat stanowiska do analizy termiczno – derywacyjnej obrazuje rys. 4.5.



Rys. 4.3. Zdjęcie próbnika z masy skorupowej [9]



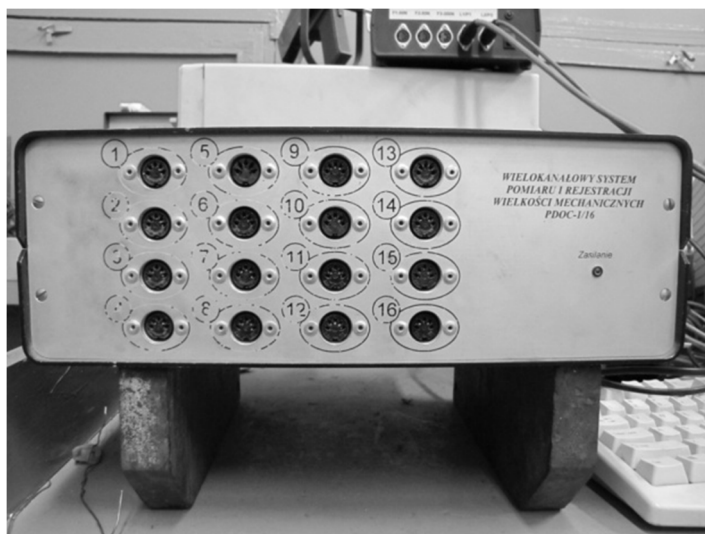
Rys. 4.4. Zdjęcie termoelementów płaszczyznowych typu K [9]



Rys. 4.5. Stanowisko do analizy termiczno-derywacyjnej (ATD) [10]: 1 – termoelementy płaszczyznowe, 2 – tuleja skorupowa, 3 – skorupowa podstawa formy, 4 – tygiel z ciekłym metalem, 5 – statyw, 6 – nakrętki do mocowania termoelementów, 7 – przewody kompensacyjne, 8 – mikroprocesorowy rejestrator, 9 – komputer

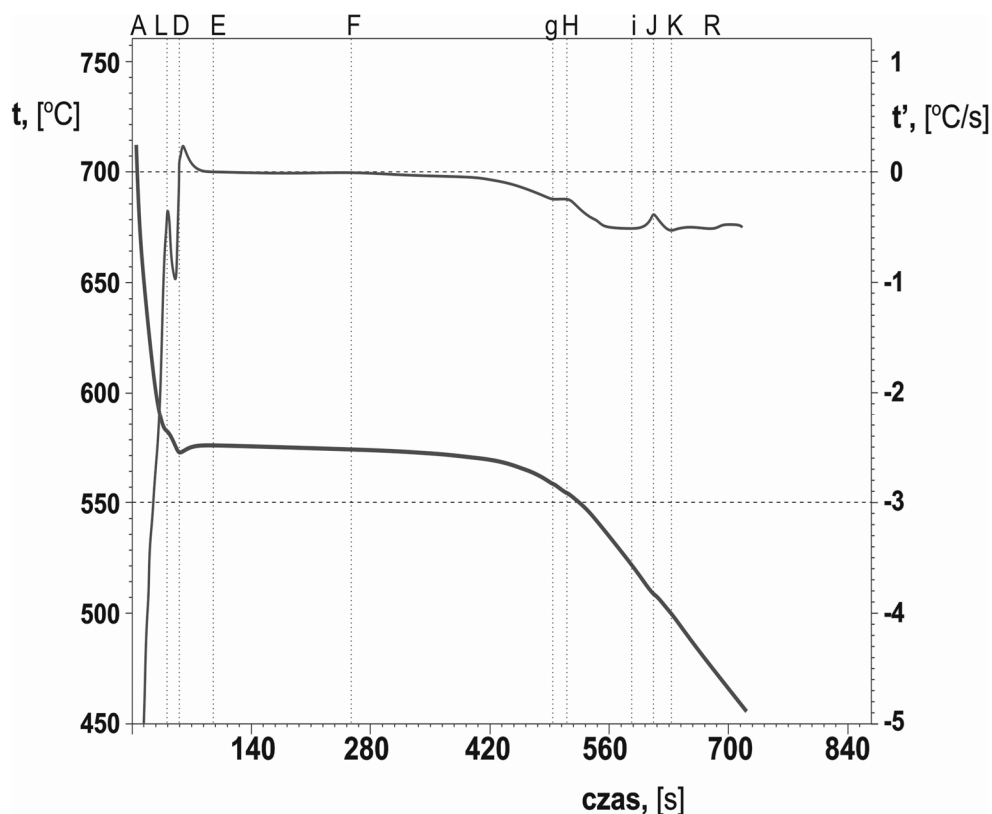
Zgodnie z zaleceniami przedmiotowej praktyki [10] w próbniku z masy skorupowej 2 umieszcza się trzy termoelementy płaszczyznowe 1 w taki sposób, aby ich spoiny znajdowały się na 1/3 wysokości próbnika. Czujniki umieszczone są w równych odstępach od siebie wzdłuż promienia próbnika. Termoelement istotny dla przedstawionego eksperymentu umieszczony jest w centrum próbnika. Dla zapewnienia stabilności pozycji czujniki przykręca się do ramienia statywu 5 za pomocą nakrętek 6 (szczegóły A). Podstawa 3 próbnika zapewnia stabilne ustawienie i uszczelnienie dna próbnika. Termoelementy podłączone są za pomocą przewodów kompensacyjnych 7 do mikroprocesorowego rejestratora PDOC – 16 8 zaprojektowanego i wykonanego na Uniwersytecie Zielonogórskim przez M. Żygadło (rys.4.6), a ten z kolei za pomocą złącza RS232 do komputera 9 [9].

Rejestrator po dokonaniu pomiarów temperatury przesyła dane do komputera, gdzie odbywa się analiza termiczno – derywacyjna.

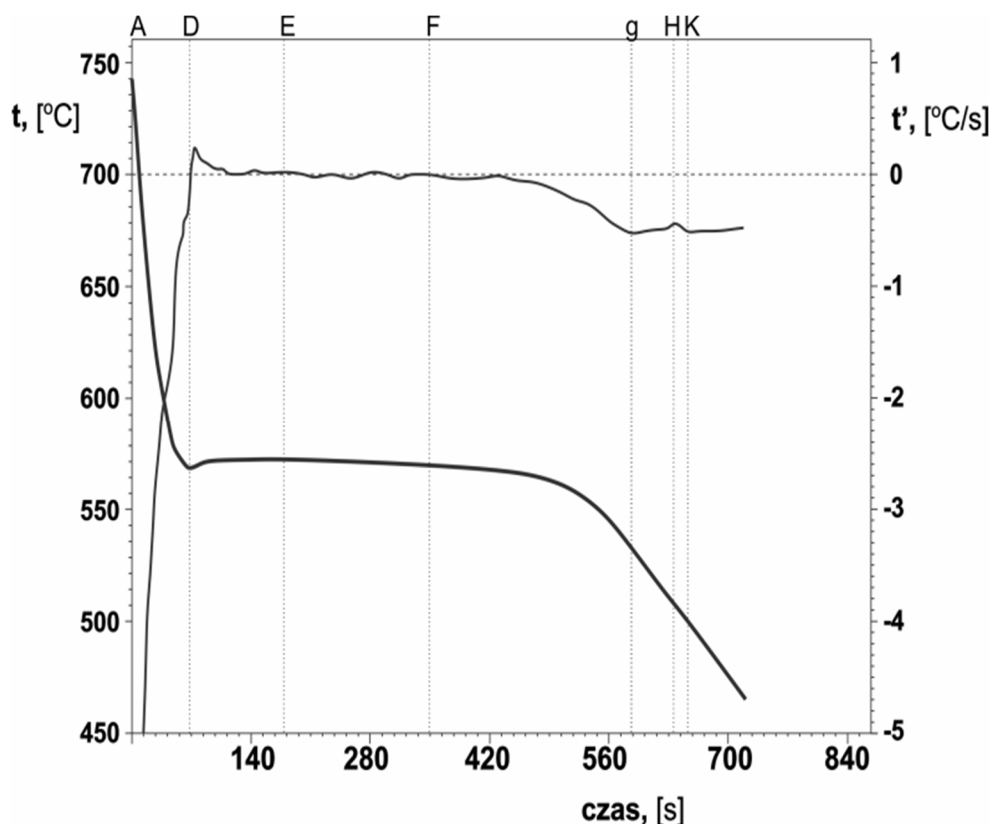


Rys. 4.6. Mikroprocesorowy rejestrator PDOC-16 [9]

## 5. Wyniki badań



Rys. 5.1. Wykres próby ATD dla stopu AlSi13.5Cu1Fe0.8 [11]



Rys. 5.2. Wykres próby ATD dla stopu AlSi13.5Cu1Fe0.8Mn0.55 [11]

Powyżej przedstawiono ilustracje ATD wykonanych pomiarów dla wybranych do badań stopów.

Na wykresach naniesiono następujące oznaczenia literowe:

- A* - temperatura zalewania,
- L* - temperatura likwidus (jeśli wystąpiło),
- D* - przechłodzenie przed temperaturą eutektyczną,
- E* - temperatura eutektyczna,
- H* - wydzielenie odrębnej fazy (jeśli wystąpiło),
- G* - wydzielenie odrębnej fazy,
- K* - koniec krystalizacji.

Wykresy wygenerowano i opisano, korzystając z opracowanego przez J. Mutwila programu o nazwie PDOC16-0-2005/1 [12,13].

## 6. Analiza wyników badań

Poniziej dla analizowanych stopów AlSi13.5Cu1Fe0.8 i AlSi13.5Cu1Fe0.8Mn0.55 zestawiono wartości wybranych parametrów (charakterystyczne temperatury) uzyskane w analizie termiczno-derywacyjnej.



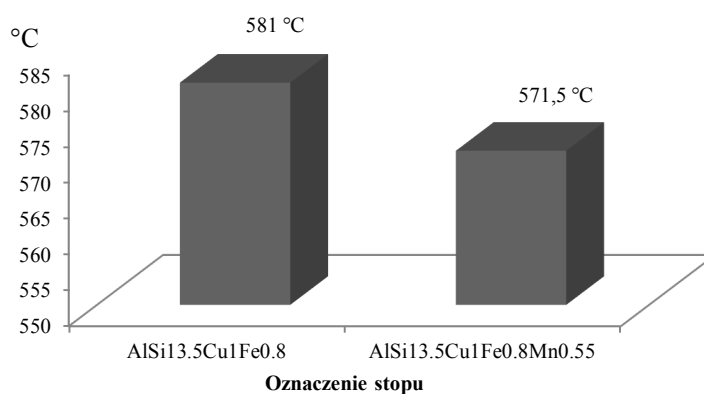
Tabela 6.1. Zestawienie wartości charakterystycznych temperatur z prób ATD dla badanych stopów

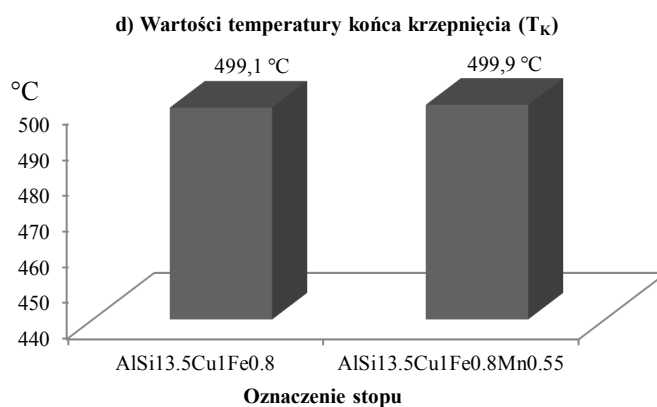
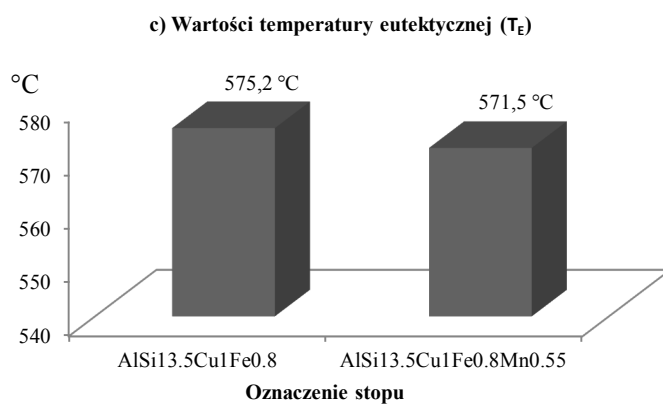
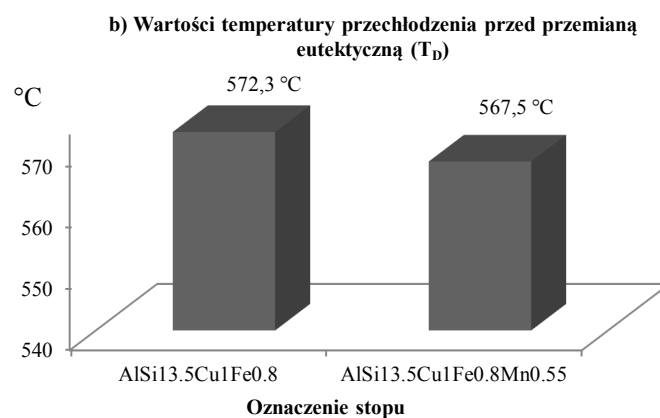
Oznaczenie stopu	Temperatura [°C]					
	T <sub>Z</sub>	T <sub>P</sub>	T <sub>L</sub>	T <sub>D</sub>	T <sub>E</sub>	T <sub>K</sub>
AlSi13.5Cu1Fe0.8	751,4	-	581,0	572,3	575,2	499,1
AlSi13.5Cu1Fe0.8Mn0.55	791,5	-	571,5	567,5	571,5	499,9

T<sub>Z</sub> – temperatura zalewania,  
T<sub>P</sub> – temperatura przechłodzenia przed przemianą likwidus,  
T<sub>L</sub> – temperatura likwidus,  
T<sub>D</sub> – temperatura przechłodzenia przed przemianą eutektyczną,  
T<sub>E</sub> – temperatura eutektyczna,  
T<sub>K</sub> – temperatura końca krzepnięcia.

Dane z tabeli 6.1. przedstawiono poniżej w postaci wykresów słupkowych, które pozwalają ocenić wpływ składu chemicznego stopu na wartości temperatur charakteryzujących krystalizację (temperatura likwidus, temperatura przechłodzenia przed przemianą eutektyczną, temperatura solidus (eutektyczna), temperatura końca krzepnięcia).

**a) Wartości temperatury likwidus (T<sub>L</sub>)**





Rys. 5.1. Wpływ składu chemicznego na wartość charakterystycznych temperatur w próbie ATD: a) temperatura likwidus; b) temperatura przechłodzenia przed przemianą eutektyczną; c) temperatura solidus; d) temperatura końca krzepnięcia

Analizując zestawione w tabeli 5.1 wyniki wartości charakterystycznych temperatur w wybranych stopach okołoeutektycznych  $\text{AlSi13.5Cu1Fe0.8}$  oraz  $\text{AlSi13.5Cu1Fe0.8Mn0.55}$  wyciągnięto następujące wnioski:

- temperatura likwidus  $T_L$  dla stopu  $\text{AlSi13.5Cu1Fe0.8}$  była wyższa o  $9,5\text{ }^\circ\text{C}$  w porównaniu ze stopem  $\text{AlSi13.5Cu1Fe0.8Mn0.55}$ ,
- temperatura przechłodzenia przed przemianą eutektyczną  $T_D$  dla stopu  $\text{AlSi13.5Cu1Fe0.8}$  była wyższa o  $4,8\text{ }^\circ\text{C}$  w porównaniu ze stopem  $\text{AlSi13.5Cu1Fe0.8Mn0.55}$ ,
- temperatura solidus  $T_E$  dla stopu  $\text{AlSi13.5Cu1Fe0.8}$  była wyższa o  $3,7\text{ }^\circ\text{C}$  w porównaniu ze stopem  $\text{AlSi13.5Cu1Fe0.8Mn0.55}$ ,
- temperatura końca krzepnięcia  $T_K$  była w obu przypadkach na zbliżonym poziomie i wynosiła dla stopu  $\text{AlSi13.5Cu1Fe0.8}$   $499,1\text{ }^\circ\text{C}$  oraz dla stopu  $\text{AlSi13.5Cu1Fe0.8Mn0.55}$   $499,9\text{ }^\circ\text{C}$ .

W wyniku analizy badań stwierdzono, iż mangan o stężeniu 0,55 miał wpływ na obniżenie temperatury stopu w procesie krystalizacji. Obniżenie temperatury powoduje zmniejszenie zużycia energii, a także zmniejszenie zanieczyszczenia środowiska. Warto nadmienić, iż w przedsiębiorstwach dąży się do obniżenia energochłonności, w związku z tym naukowcy wykonują różnego rodzaju badania zmierzające do jej poprawy [14].

## 7. Podsumowanie

Przedstawiona analiza termiczno-derywacyjna (ATD) pozwala na badanie przebiegu procesu krystalizacji, dzięki czemu znajduje szerokie zastosowanie w kontroli produkcji stopów w zakładach przemysłowych. Metoda analizy termiczno-derywacyjnej stała się poszerzeniem metody termicznej, która polega na rejestrowaniu temperatury w sposób ciągły. Dodatkowo dzięki metodzie ATD rejestrowana jest pochodna temperatury po czasie. Analiza termiczno-derywacyjna pozwala ocenić strukturę odlewu (co ma również znaczenie przy tworzeniu nowych stopów), który stanie się półfabrykatem do wytworzenia produktu poprzez obróbkę plastyczną. Przy użyciu metody ATD można sterować składem chemicznym oraz temperaturami przebiegu krystalizacji (jak ukazano na przykładzie wybranych siluminów poprzez dodanie pierwiastka manganu). Ma to wpływ na uzyskanie wysokiej jakości odlewu, a dzięki temu przedsiębiorstwa będą mogły zapewnić bezpieczny przebieg procesu, ustabilizować powtarzalność produkcji, obniżyć energochłonność, a co za tym wszystkim idzie, obniżyć koszty.

## Literatura

1. Praca zbiorcza (red. Franciszek Grosman). Technologia metali. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2010.
2. Perzyk M.: Waszkiewicz S., Kaczorowski M., Jopkiewicz A.: Odlewnictwo Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa, 2004.
3. Pietrowski S.: Siluminy, Politechnika Łódzka, Łódź, 2001.
4. Poniewierski Z.: Krystalizacja struktura i właściwości siluminów, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1989.
5. Kuczmaszewski J.: Efektywność wytwarzania elementów lotniczych ze stopów aluminium i magnezu. Komputerowo zintegrowane zarządzanie. Oficyna Wyd. Polskiego Towarzystwa Zarządzanie Produkcją, Opole, 201, s. 7-18.

6. Posmyk A.: Wpływ nowych technologii i materiałów na poprawę jakości transportu. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Transport, Gliwice, 2012, z. 78, s. 133-138.
7. Wiecheć J., Uliasz P., Knych T., Piwowarska-Uliasz M., Paśko J.: Badania nad technologią kształtowania własności odlewniczego stopu aluminium AlSi5Mg0, Rudy i Metale Nierzelazne Recykling. Wyd. SIGMA-NOT, 2014, rozdz. 59, nr 2, 69-75.
8. Gawroński J., Szajnar J., Jura Z., Studnicki A.: Profesor Stanisław Jura twórca teorii i zastosowań przemysłowych diagnostyki oraz zużycia metali i stopów, Wydawnictwo PAN, Katowice, 2004.
9. Jasiewicz T.: Analiza jakości ciekłych siluminów z grupy AlSiMgTi w oparciu o analizę procesu ich kurczenia się w okresie krzepnięcia i stygnięcia, Praca Inżynierska Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra, 2010.
10. Mutwil J., Kujawa K.: Badanie wytrzymałości na rozciąganie metali i stopów w okresie ich krzepnięcia i stygnięcia, Oficyna Wydawnicza UZ, Zielona Góra, 2006.
11. Senddecki A., Leksycki K.: Analiza jakości ciekłych siluminów z grupy AlSi9Cu, AlSi(Cu), AlSiCuNiMg w oparciu o analizę procesu ich kurczenia się w okresie krzepnięcia i stygnięcia, Praca Dyplomowa Magisterska Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra, 2010.
12. Mutwil J., Żygadło M.: Mikrokomputerowy system do badania zjawisk i procesów odlewniczych, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, vol. 20, nr1, 2000, s. 117-126.
13. Żygadło M.: Projekt mikroprocesorowego rejestratora do pomiarów odlewnictwie, Raport wewnętrzny z projektu KBN Nr 7 T08B 032, Zielona Góra, 1999.
14. Gil A., Kowalski P., Wańczak K.: Próba obniżenia energochłonności produkcji podzespołów przekładni planetarnej w oparciu o technologię odlewania z wykorzystaniem metod szybkiego prototypowania, Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, 2012, vol. 57, nr1.

Dr inż. Roman KIELEC  
 Instytut Informatyki i Zarządzania Produkcją  
 Uniwersytet Zielonogórski  
 65-417 Zielona Góra, ul. Licealna 9  
 tel./fax.: 504070243  
 e-mail: r.kielec@iizp.uz.zgora.pl

Mgr inż. Kamil LEKSYCKI  
 Park Naukowo-Technologiczny  
 Uniwersytetu Zielonogórskiego Sp. z o.o.  
 65-417 Zielona Góra, ul. Licealna 9  
 tel./fax.: (0-68) 328 21 11  
 e-mail: k.leksycki@pnt.uz.zgora.pl