

## NUMERYCZNA SYMULACJA TERMICZNEJ IDENTYFIKACJI POROWATOŚCI GAZOWEJ I WTRĄCEŃ W STOPACH ALUMINIUM

Jerzy MADEJ\*, Maksymilian DUDYK\*\*

\*Katedra Podstaw Budowy Maszyn, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Akademia Techniczno-Humanistyczna,  
ul. Willowa 2, 43-300 Bielsko-Biała

\*\*Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji, Akademia Techniczno-Humanistyczna,  
ul. Willowa 2, 43-300 Bielsko-Biała

[juma@ath.bielsko.pl](mailto:juma@ath.bielsko.pl), [mdudyk@ath.bielsko.pl](mailto:mdudyk@ath.bielsko.pl)

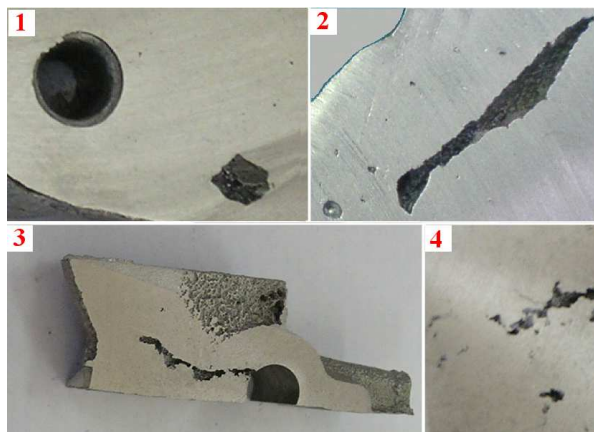
**Streszczenie:** W pracy omówiono wyniki symulacji numerycznych, przedstawiających rozkład temperatury w kokilowych odlewach aluminiowych w momencie zalewania formy i we wczesnym okresie stygnięcia odlewu. Szczególną uwagę zwrócono na wpływ zagazowania odlewu i obecności obcych wtrąceń na rozkład temperatury na powierzchni metalu, stygnącego w kokili stalowej. Zbadano również możliwość zlokalizowania defektów wewnętrznych poprzez analizę rozkładu temperatury na powierzchni odlewu, poddanej działaniu krótkotrwałego impulsu cieplnego. Analizując rozkład temperatury badanej powierzchni odlewu zaobserwowano zmiany przewodnictwa cieplnego materiału spowodowane obecnością defektów wewnętrznych. Zmiany te zobrazowane na załączonych termogramach i termoprofilach pozwalają na jednoznaczną lokalizację obszarów występowania defektów. Uzyskane wyniki potwierdzają efektywność termicznej metody lokalizowania stref potencjalnych defektów w stopach bezpośrednio po zalaniu formy oraz diagnozowania wad w gotowych odlewach.

### 1. WPROWADZENIE

Aluminium należy do metali o bardzo dużym znaczeniu technicznym i jest stosowane zarówno w postaci czystego metalu jak i w postaci stopów. Wprowadzenie dodatków stopowych i obróbka cieplna stopów aluminium wpływa w sposób znaczący na ich własności wytrzymałościowe i odporność termiczną. W odlewach wykonywanych ze stopów aluminium może jednak dochodzić do różnego rodzaju wad i uszkodzeń. Mogą one być wynikiem składu stopowego, zastosowania niewłaściwego lub zanieczyszczonego materiału wsadowego, nieodpowiednim przebiegiem procesu topienia, rafinacji, odtleniania lub źle przeprowadzonego procesu przygotowania i zalewnia formy (Dudyk, 2007).

Pośród rozmaitych wad dyskwalifikujących odlew wyróżnia się wady kształtu, które najczęściej są wynikiem odkształcenia formy, niewłaściwego jej zalania, lub nieodpowiedniego ciśnienia metalostatycznego. Innym rodzajem wad są wady powierzchniowe, które powstają najczęściej w wyniku zanieczyszczenia lub uszkodzenia formy albo nieodpowiedniego przygotowania stopu odlewniczego. Wydzielanie się gazów podczas zalewania formy i stygnięcia odlewu oraz niewłaściwe wymieszanie składników stopu skutkuje powstaniem w odlewach wad wewnętrznych, mających postać jam skurczowych, pęcherzy, porów i wtrąceń obcego materiału. Przykładowe wady wewnętrzne, występujące w odlewach aluminiowych zostały przedstawione na Rys. 1.

Wady w odlewach aluminiowych są częstym problemem powodującym obniżenie wytrzymałości odlewu i podwyższenie kosztów procesu technologicznego oraz wpływają na dalszą obróbkę mechaniczną i bezpieczną eksploatację odlewu. Szybkie określenie rodzaju wady oraz przyczyny i miejsca jej występowania ma wpływ na właściwy przebieg procesu odlewania i zmniejszenie ilości braków. Metody badań diagnostycznych stosowane aktualnie w procesie kontroli odlewów charakteryzują się skutecznością, zależną od rodzaju badanego obiektu, czułości metody i rodzaju oraz miejsca wystąpienia defektu. Dodatkowymi czynnikami utrudniającymi skuteczną diagnostykę jest wielka zmienność i stopień komplikacji kształtów odlewów, oraz złożoność procesów odlewniczych wraz z dużą liczbą parametrów, które mogą wpływać na ich przebieg. W efekcie trudno jest wskazać metodę diagnostyczną, która byłaby jednocześnie prosta, szybka i odpowiednio efektywna a zarazem możliwa do zastosowania na każdym etapie produkcji odlewu.



**Rys. 1.** Wady w odlewach: 1 - wtrącenie obcego materiału, 2 - jama skurczowa, 3 - żyła rzadzinny, 4 - jamy skurczowe i porowatość

## 1.1. Metody diagnozowania wad

Najczęściej stosowanymi w odlewnictwie metodami badań nieniszczących, pozwalającymi wykryć nieciągłości powierzchniowe odlewów są obserwacje powierzchni przy pomocy przyrządów optycznych, zastosowanie substancji penetrujących i lakierniczych powłok termicznych, zmieniających barwę w miejscach defektów pod wpływem ogrzania. Stwierdzenie istnienia wad wewnętrznych uzyskuje się wykonując próbę szczelności, badania radiologiczne, magnetyczne, ultradźwiękowe, lub pomiar masy właściwej. Żadna z wymienionych metod nie jest jednak ani prosta, ani szybka do przeprowadzenia i wymaga bezpośredniego kontaktu z badanym przedmiotem. Żadna z nich nie nadaje się również do lokalizacji wady w procesie krzepnięcia odlewu, czyli w okresie, w którym następuje kształtowanie się większości wad wewnętrznych.

Praktyka diagnostyczna wskazuje, że pomimo istnienia wielu metod diagnostycznych, nie ma metody uniwersalnej zarówno w odniesieniu do rodzaju badanych obiektów, jak i w odniesieniu do rodzaju i charakteru defektu. Pewne rodzaje defektów mogą pozostać niezauważone na przykład wtedy, gdy są niekorzystnie zorientowane względem kierunku rozchodzenia się fal ultradźwiękowych, kierunku przepływu prądów wirowych, czy kierunku pola elektromagnetycznego, toteż komplementarne stosowanie różnych metod i poszukiwanie nowych metod diagnostycznych wydaje się w pełni uzasadnione.

## 2. TERMICZNA METODA LOKALIZACJI WAD

Jedną ze zmian własności materiału, jakie towarzyszą zmianom jego struktury jest zmiana przewodnictwa cieplnego, dokonująca się w obszarach występowania defektów. Warunkiem otrzymania informacji o istnieniu defektów może być zatem zarówno analiza rozkładu temperatury na powierzchni odlewu podczas jego krzepnięcia, jak i badanie odpowiedzi termicznej materiału wywołanej zewnętrzną stymulacją cieplną.

Jednym ze sposobów stymulacji cieplnej może być punktowe ogrzewanie badanej powierzchni. Zmiany przewodności cieplnej spowodowane obecnością defektów powierzchniowych wywołują zmiany w rozkładzie temperatury w stosunku do tego, jaki rejestruje się na powierzchni pozbawionej uszkodzeń. Zjawisko to potwierdzone doświadczalnie zostało szerzej przeanalizowane w pracach Madeja (2003a, b, 2005).

Innym sposobem stymulacji cieplnej jest równomierne nagrzanie powierzchni badanego elementu impulsem cieplnym. Obecność defektów, różniących się właściwościami termicznymi od pozostałych obszarów próbki, wywołuje zmiany w szybkości dyfuzji cieplnej, co ma swoje odbicie w rozkładzie temperatury na powierzchni badanego elementu. Rejestrując ten rozkład termografem podczerwieni i porównując go z rozkładem temperatur wzorca wolnego od uszkodzeń, można z powodzeniem zlokalizować położenie defektów powierzchniowych lub nieciągłości leżących w warstwie przypowierzchniowej (Sahnoun i inni, 2003; Sun 2006; Madej i inni, 2007). Grubość warstwy przypo-

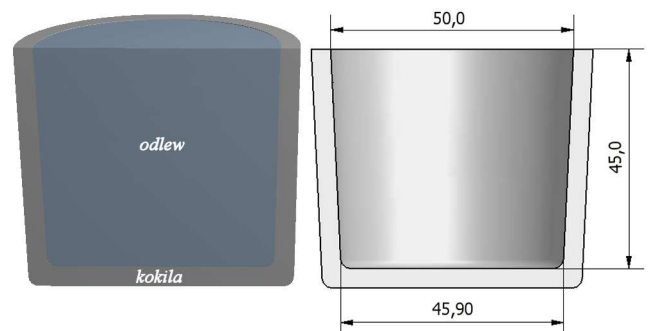
wierzchniowej, w której można zlokalizować defekt zależy od rodzaju badanego materiału, wielkości i kształtu defektu oraz od mocy impulsu cieplnego.

W przypadku termografii impulsowej pewnym problemem występującym podczas lokalizacji uszkodzeń może być uzyskanie wystarczającego impulsu wzbudzającego zwłaszcza, że warunki jego odprowadzania są zwykle mocno niejednorodne. Stanowi to pewną słabość i ograniczenie możliwości zastosowań praktycznych metody. Jednak dzięki rozwojowi sprzętu termowizyjnego, jaki nastąpił w ostatnich latach a w szczególności jego dużej czułości rzędu 0,001K i rozdzielczości matrycy 640x521 pikseli oraz możliwości rejestracji szybkozmiennych przebiegów temperatury w czasie rzeczywistym, zaistniała realna możliwość zastosowania termografii impulsowej jako skutecznej metody diagnostycznej do badania jakości odlewów.

## 2.1. Wykrywanie wad podczas procesu stygnięcia odlewu

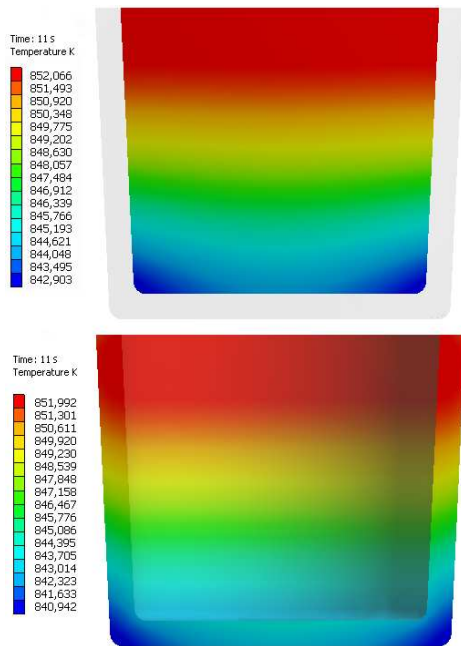
W pierwszej części prezentowanej pracy przeprowadzono symulację rozkładu temperatury, jaka występuje na powierzchni stopu aluminium odlewane do kokili stalowej. Wszystkie prezentowane wyniki zostały uzyskane przy wykorzystaniu systemu analizy strukturalnej ANSYS-11.

Jako pierwszy rozważono przypadek stopu o idealnej strukturze wewnętrznej. Założona temperatura początkowa stopu wynosiła 973K a temperatura otoczenia 293K. Współczynnik przejmowania (konwekcji) przyjęto równy 20W/m<sup>2</sup>K. W obliczeniach pominięto zjawiska skurczu przemian fazowych, jakie mają miejsce w czasie krzepnięcia odlewu. Model rozważanego obiektu przedstawiono na Rys. 2.

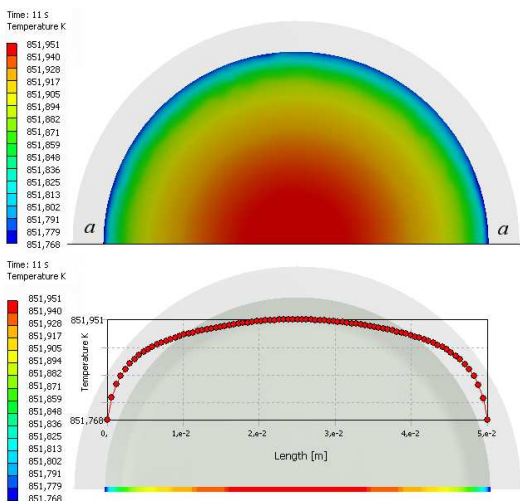


Rys. 2. Model odlewu w kokili (połowa)

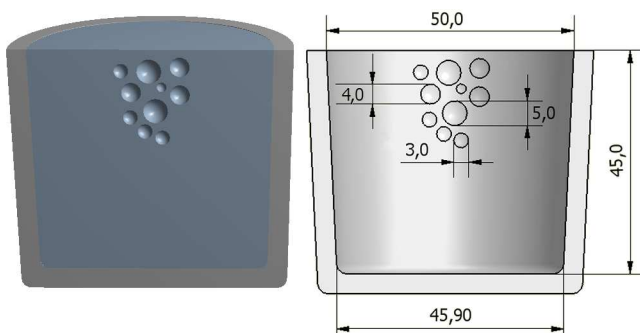
Na Rys. 3 przedstawiono rozkład temperatury w przekroju odlewu i w kokili po upływie 11 sekund od zalania kokili. Rysunek 4 przedstawia rozkład temperatury na powierzchni krzepnącego odlewu po 11 sekundach od chwili wylania stopu do kokili i termoprofil, czyli rozkład temperatury w punktach leżących na linii *a-a* po upływie 11 sekund od chwili wylania odlewu. Na przedstawionych rysunkach widać, że rozkład temperatury przebiega symetrycznie względem osi modelu.



**Rys. 3.** Rozkład temperatury w przekroju odlewu i w kokili w 11 sek.



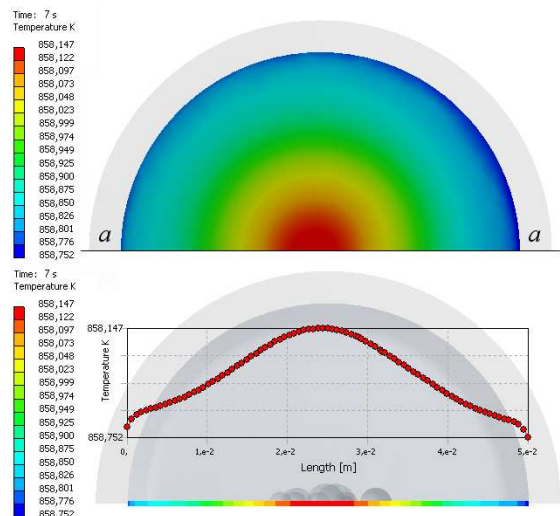
**Rys. 4.** Rozkład temperatury na powierzchni i termo profil na linii *a-a* po upływie 11 sek.



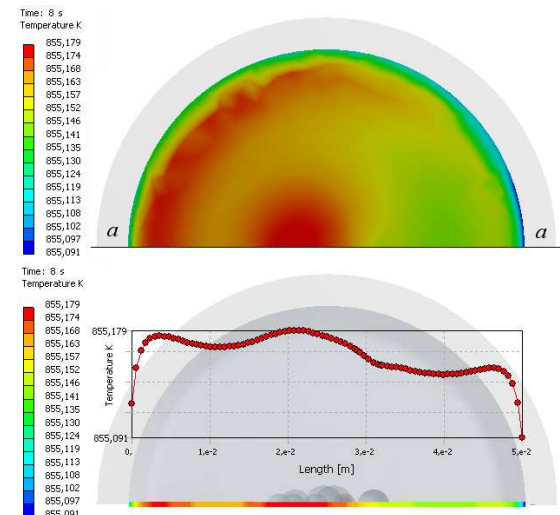
**Rys. 5.** Model odlewu z pęcherzykami powietrza

Kolejne obliczenia przeprowadzono dla odlewu, w którym zamodelowano pęcherzyki powietrza. Rozmieszczenie i rozmiar pęcherzyków powietrza przedstawiono na Rys. 5. Na Rys. 6, 7 i 8 pokazano rozkład temperatury na powierzchni odlewu oraz termoprofil na linii *a-a* odpowiednio

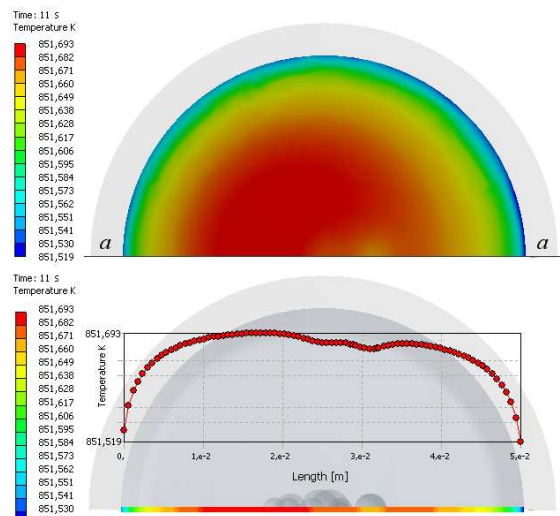
po upływie 7, 8 i 11 sekund od chwili zalania formy.



**Rys. 6.** Rozkład temperatury na powierzchni odlewu oraz termoprofil na linii *a-a* po upływie 7 sek.



**Rys. 7.** Rozkład temperatury na powierzchni odlewu oraz termoprofil na linii *a-a* po upływie 8 sek.



**Rys. 8.** Rozkład temperatury na powierzchni odlewu oraz termoprofil na linii *a-a* po upływie 11 sek.

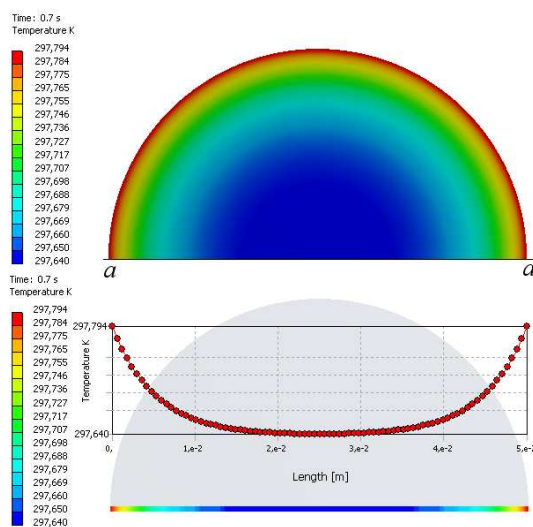


Na prezentowanych rysunkach widać, że obecność pęcherzyków gazu w odlewie znacząco wpływa na rozkład temperatury na jego powierzchni. Już w 8 sekundzie na powierzchni odlewu obserwuje się wyraźne zmiany w rozkładzie temperatury w stosunku do rozkładu temperatury dla odlewu bez pęcherzyków gazowych. W 11 sekundzie od chwili zalania kokili na termogramie można zaobserwować kontur większych pęcherzy powietrza. Podobne zmiany wskazujące na obecność defektów w obszarach położonych pod powierzchnią odlewu są również zauważalne w termoprofilach. Pomimo, że różnice temperatur poszczególnych punktów, leżących na powierzchni odlewu są niewielkie, to jednak w praktyce diagnostycznej mogą być z łatwością zauważone przy użyciu odpowiednio czułych przyrządów termowizyjnych.

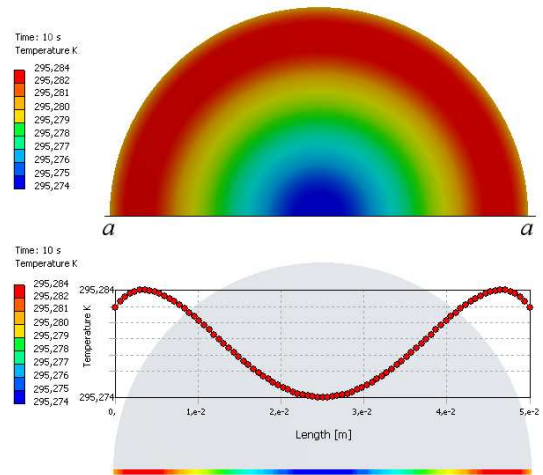
## 2.2. Wykrywanie wad metodą nagrzewania impulsowego

Druga część pracy dotyczy zbadania możliwości wykrywania defektów wewnętrznych w gotowym odlewie poprzez analizę termogramów powierzchni odlewu ogrzanej impulsem cieplnym. W tym celu przeprowadzono symulację numeryczną stymulacji cieplnej górnej powierzchni badanego obiektu impulsem cieplnym o mocy  $1 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ , w okresie 2 sekund. Założono, że temperatura otoczenia wynosi 293K a wymiana ciepła występuje ze współczynnikiem przejmowania równym  $20 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Rozkład temperatury liczonego w okresie nagrzewania i w okresie stygnięcia (po upływie 2 sekund) odlewu. Obliczony rozkład temperatury dla wybranych chwil czasu rejestracji przedstawiono w postaci termogramów górnej powierzchni odlewu i termoprofilu na linii *a-a*. Rysunki 9-11 przedstawiają termogramy górnej powierzchni wraz z termoprofilem na linii *a-a* dla odlewu bez defektów, kolejno dla 0,7, 10, i 15 sekundy obserwacji.

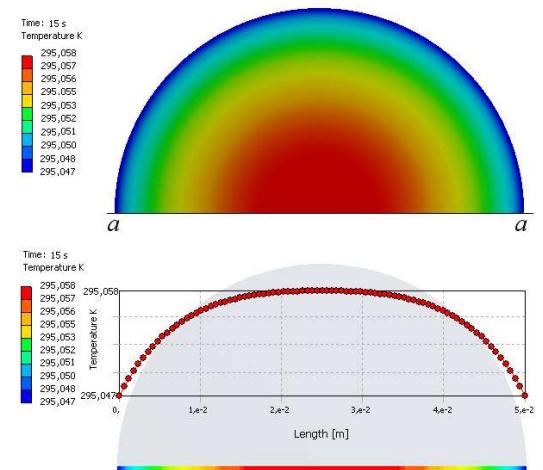
Na rysunkach 12-14 przedstawiono termogramy i termoprofil na linii *a-a* dla odlewu z wadą porowatości w 0,7, 10, i 15 sek. obserwacji. Model odlewu porowatego jest identyczny z tym, jaki zaprezentowano na Rys. 5.



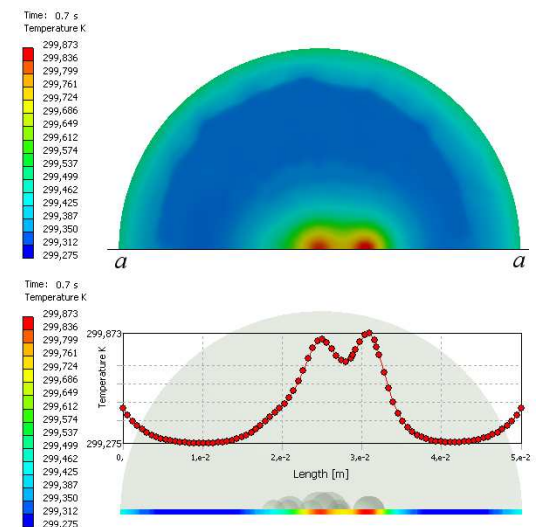
Rys. 9. Termogram odlewu bez defektów i termoprofil na linii *a-a* w 0,7 sek. (nagrzewanie)



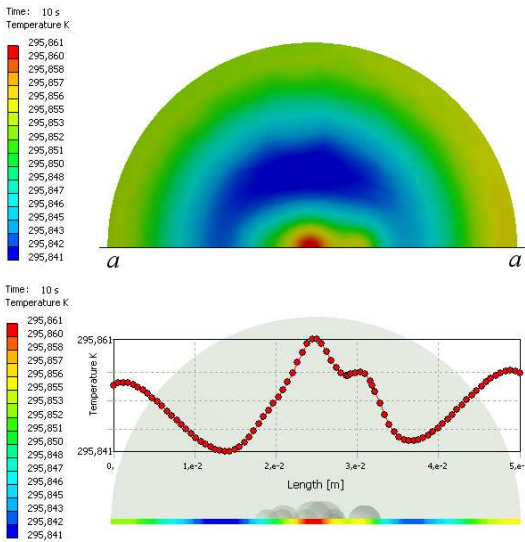
Rys. 10. Termogram odlewu bez defektów oraz termoprofil na linii *a-a* w 10 sek. (chłodzenie)



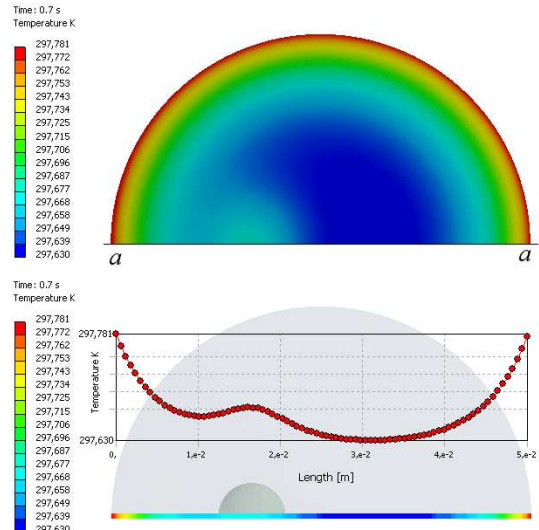
Rys. 11. Termogram odlewu bez defektów oraz termoprofil na linii *a-a* w 15 sek. (chłodzenie)



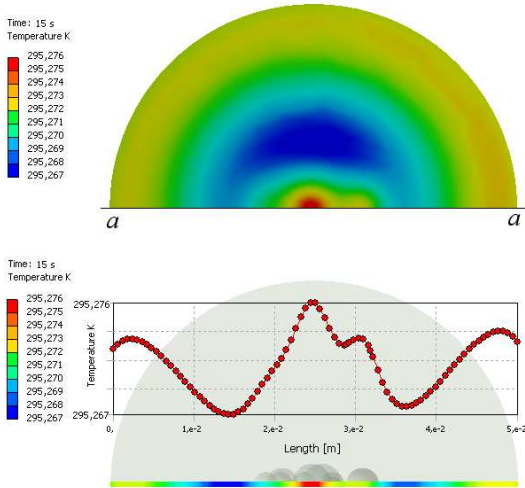
Rys. 12. Termogram odlewu porowatego i termoprofil na linii *a-a* w 0,7 sek. (nagrzewanie)



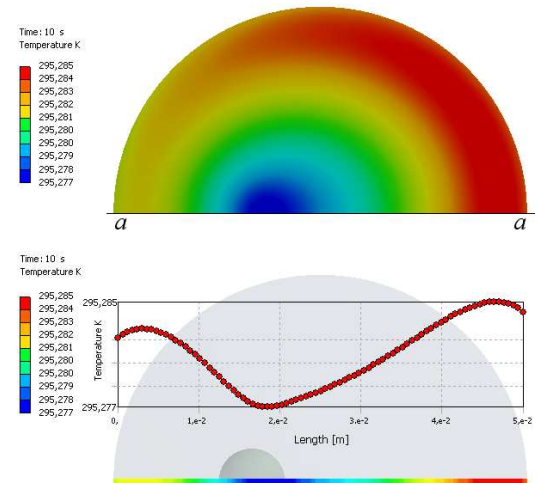
**Rys. 13.** Termogram odlewu porowatego i termoprofil na linii *a-a* w 10 sek. (stygnięcie)



**Rys. 16.** Termogram odlewu z wtrąceniem krzemowym i termoprofil na linii *a-a* w 7 sek. (nagrzewanie)

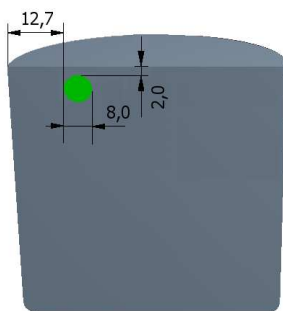


**Rys. 14.** Termogram odlewu porowatego i termoprofil na linii *a-a* w 15 sek. (stygnięcie)



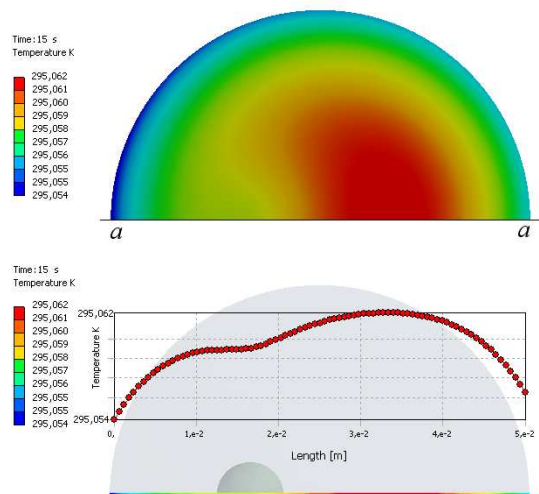
**Rys. 17.** Termogram odlewu z wtrąceniem krzemowym i termoprofil na linii *a-a* w 10 sek. (stygnięcie)

Na Rys. 15 przedstawiono model odlewu z wtrąceniem krzemowym w kształcie kulki o średnicy 8mm.



**Rys. 15.** Model z wtrąceniem krzemowym

Termogramy górnej powierzchni i termoprofil na linii *a-a* dla odlewu z wadą wtrącenia dla 0,7, 10, i 15 sekundy obserwacji zaprezentowano na Rys. 16-18.



**Rys. 18.** Termogram odlewu z wtrąceniem krzemowym i termoprofil na linii *a-a* w 15 sek. (stygnięcie)

Z przedstawionych termogramów wynika, że obecność defektów, różniących się właściwościami termicznymi od właściwości termicznych materiału stopowego, wywołuje zmianę szybkości dyfuzji cieplnej, co ma swoje odbicie w rozkładzie temperatury na powierzchni odlewu. Znając termogramy i termoprofile dla odlewu pozbawionego wad wewnętrznych i porównując je z odpowiednikami uzyskanymi dla odlewów zawierających defekty można jednoznacznie wskazać istnienie wady, jej lokalizację, obszar występowania i kształt.

W praktyce diagnostycznej obraz termiczny odlewu można uzyskać przy pomocy termografu podczerwieni, który w sposób bezkontaktowy rejestruje temperaturę powierzchni badanego obiektu. Metodą termografii impulsowej można wykryć defekty wewnętrzne odlewów, efektywność metody zależy jednak od wielkości wady i głębokości jej występowania oraz od częstotliwości wzbudzonej fali termicznej i rodzaju badanego materiału.

### 3. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone symulacje numeryczne i uzyskane tą drogą wyniki pozwalają przypuszczać, że rejestrując rozkład temperatury na powierzchni odlewu już podczas jego krzepnięcia i stygnięcia można wstępnie prognozować jego jakość. Można również, stosując stymulację cieplną gotowego odlewu skutecznie badać obecność i lokalizację większych defektów wewnętrznych, dyskwalifikujących odlew do dalszej obróbki i użytkowania.

Prezentowana metoda termiczna może stanowić alternatywę dla aktualnie stosowanych, nieniszczących metod diagnostycznych, lub może być z nimi użyta komplementarnie. Jej niewątpliwą zaletą jest to, że badanie może być przeprowadzone w sposób bezkontaktowy, zatem może być stosowana wszędzie tam, gdzie z uwagi na występowanie wysokich temperatur lub innych czynników zewnętrznych nie mogą być stosowane metody wymagające kontaktu z badanym obiektem. Zaletą metody jest także możliwość rejestrowania temperatury równocześnie we wszystkich punktach badanego obszaru. Duża czułość termiczna dostępnych aktualnie kamer termowizyjnych umożliwia rejestrację nawet bardzo niewielkich zmian temperatury na badanej powierzchni a zarejestrowane dane pomiarowe mogą być poddane wszechstronnej analizie w czasie niezależnym od czasu wykonania pomiaru. Termiczna metoda diagnostyczna nie wymaga stosowania preparatów, pozostających w kontakcie z badanym obiektem, toteż nie pozostawia na jego powierzchni żadnego śladu czy koniecznych do usunięcia pozostałości, jak ma to miejsce w przypadku stosowania penetrantów. Metoda może być stosowana do badania szerokiej klasy materiałów, jest nieszkodliwa dla środowiska, szybka i wygodna do przeprowadzenia.

Wadą metody jest utrzymujący się na wysokim poziomie koszt urządzeń termowizyjnych oraz możliwość detekcji tylko tych defektów, których właściwości termiczne różnią się od właściwości materiału, w którym powstają. Pewną trudność może również stanowić wygenerowanie jednorodnego, wysokoenergetycznego cieplnego impulsu stymulującego oraz zapewnienie jednorodnej emisyjności badanej powierzchni.

### LITERATURA

1. **Dudyk M., Aslanowicz J., Ościłowski L.** (2007), Upgrading the alloy AlSi6Cu4(AK64) cast to the ceramic mould, *Archives of Foundry Engineering*, 7,4,2007, 43-48
2. **Madej J.** (2003a), Influence of damage on variations of material thermal properties, *Eng. Trans.* 51, 1.
3. **Madej J.** (2003b), Damage diagnostics of Turbine Blades, *Arch. of Mech. Eng.*, v.L,1.
4. **Madej J.** (2005), Thermograms of damages, *Mechanics Research Communication*,32, Elsevier.
5. **Madej J. i inni** (2007), Analiza termogramów w obszarach uszkodzeń, *XI Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania*, Kielce-Cedzyna.
6. **Sahnoun S., Belattar S., Tmiri A.** (2003), Finite differences method applied to the analysis of the detection and localisation of plan defect, *NDT.net - February 2003*, Vol. 8 No.2
7. **Sun J.G.** (2006), Analysis of Pulsed Thermography Methods for Defect Depth Prediction, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 128, No. 4, 329-338.

### NUMERICAL SIMULATION OF THERMAL IDENTIFICATION OF GAS POROSITY AND INCLUSIONS IN ALUMINUM ALLOYS

**Abstract:** The paper presents the results of numerical simulations showing temperature distribution in the mould aluminum casting during the pouring mould and in the early phase of self-cooling of the casting. Special attention was devoted to the influence of gas pores and inclusions on the temperature distribution on the casting surface during self-cooling in steel mould. A possibility of locating inner defects by means of analysis of distribution of temperature on the casting surface submitted with short thermal impulse was investigated. Changes of thermal conductance caused by the presence of inner defects were observed by analyzing the temperature distribution on the casting surface. These changes presented on the included thermographs and thermo profiles enable to unequivocally locate the regions containing defects. The results achieved confirm the effectiveness of the thermal method for locating potential defect regions in alloys directly after the pouring into moulds and for diagnosing the defects in ready castings.