

---

ROZKŁAD WIELKOŚCI PODŁOŻA DO ZARODKOWANIA HETEROGENICZNEGO  
FAZY PIERWOTNEJ STOPU Al-Cu

Janusz Lelito<sup>1</sup>, Beata Gracz<sup>\*2</sup>, Paweł L. Żak<sup>3</sup>, Józef Sz. Suchy<sup>4</sup>, Michał Szucki<sup>5</sup>, Paweł Malinowski<sup>5</sup>

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza. Wydział Odlewnictwa.  
ul. Reymonta 23, 30-059 Krakow  
<sup>\*</sup>gracz@agh.edu.pl

**Słowa kluczowe:** rozkład logarytmiczno-normalny, rozkład Oldfielda, rozkład eksponencjalny;

### 1. Wprowadzenie

W numerycznym modelowaniu struktury odlewów wykorzystuje się równania opisujące funkcję gęstości ziaren w zależności od stopnia przechłodzenia [1 - 3], bądź jak ma to miejsce w przypadku modelu FreeGrowth, rozkład wielkości podłoża do zarodkowania heterogenicznego [4 - 6]. Jednym z głównych założeń modelu FreeGrowth jest logarytmiczno-normalny rozkład wielkości podłoży do zarodkowania heterogenicznego. Z tych też względów zagadnienie zarodkowania jest przedmiotem licznych badań teoretycznych i doświadczalnych [1 - 7]. Efektem tych badań są różne prawa zarodkowania. Najczęściej wykorzystywane do numerycznego modelowania procesu krystalizacji są następujące zależności: Oldfielda [1], eksponencjalny [3] i logarytmiczno normalny [4 - 6]. Występujące w tych zależnościach parametry określone są empirycznie dla każdego stanu fizykochemicznego ciekłego metalu. Zasadniczym celem tej pracy jest wyznaczenie w powyższych równaniach, parametrów dopasowania krzepnącego stopu Al-Cu na podstawie badań doświadczalnych zamieszczonych w literaturze [8] a następnie ich porównanie.

### 2. Wyniki

W celu określenia kinetyki zarodkowania stopu Al-Cu posłużono się zależnościami empirycznymi, które są wykorzystywane przy numerycznym modelowaniu procesu krystalizacji.

$$\text{Zależność Oldfielda: } N_V = Y \Delta T^m, m^{-3} \quad (1)$$

$$\text{Zależność eksponencjalna: } N_V = \lambda \exp(-b/\Delta T), m^{-3} \quad (2)$$

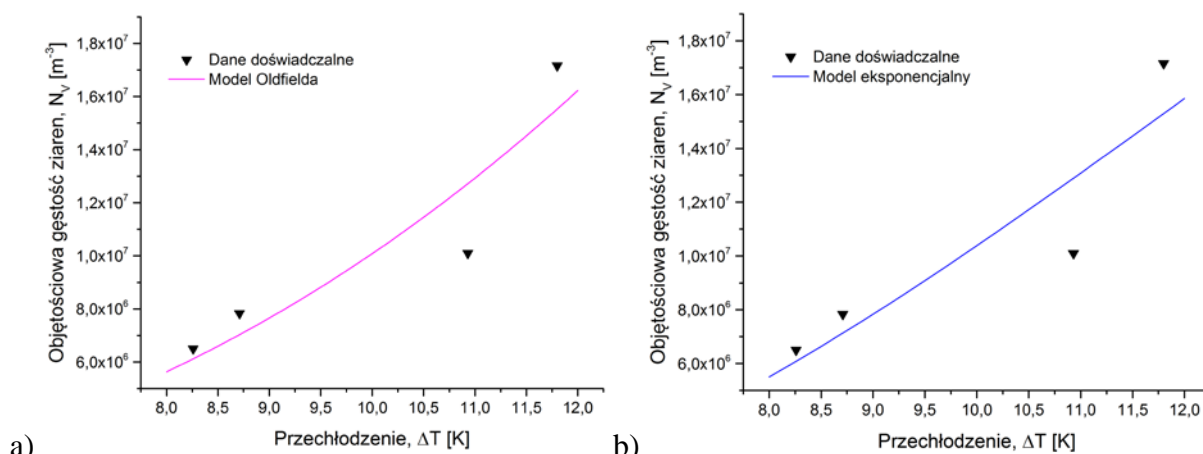
Zależność logarytmiczno-normalna:

$$n(d) = \frac{N_0}{\sigma \cdot d \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{[\ln(d) - \ln(d_0)]^2}{2 \cdot \sigma^2}\right), m^{-3} \quad (3)$$

gdzie:  $Y$ ,  $m$ ,  $\lambda$  i  $b$  – parametry krystalizacji, które można wyznaczyć doświadczalnie,  $N_0$  – zakładana totalna populacja podkładek/podłoży zarodkowania (zarówno aktywnych jak i nieaktywnych),  $d_0$  – średnia geometryczna rozkładu log-normal,  $\sigma$  – odchylenie standardowe dystrybucji,  $d$  – średni wymiar charakterystyczny (sprowadzona średnica) powierzchni podłoża do zarodkowania heterogenicznego.

Aby wyznaczyć parametry krystalizacji do powyższych zależności (1), (2) i (3), wykorzystano dane doświadczalne z literatury [8].

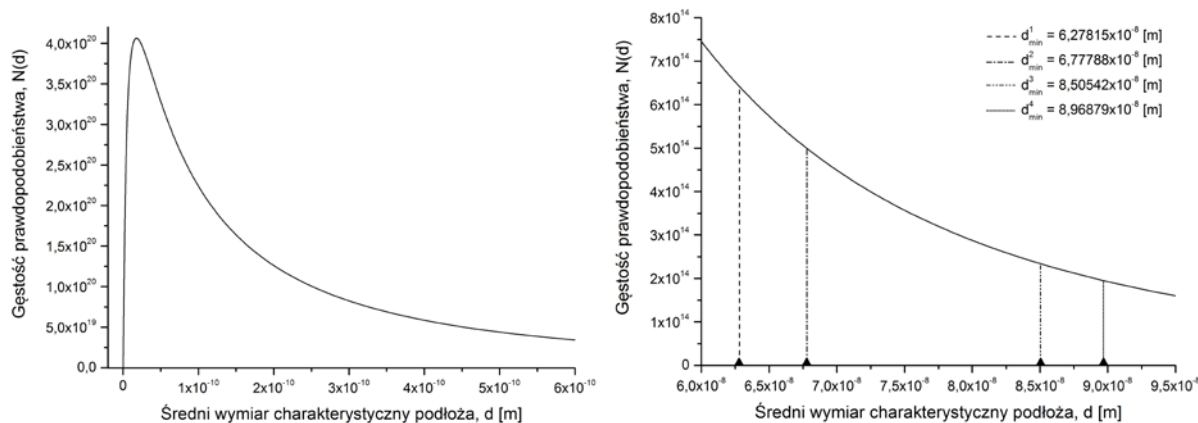
Wyniki analizy statystycznej dla modelu Oldfielda i eksponencjalnego zestawiono i pokazano na rysunku 1.



**Rys. 1.** Wpływ stopnia przechłodzenia na gęstość ziaren fazy pierwotnej  $\alpha(Al)$  w stopie Al-Cu według modelu: *a* - Oldfielda ( $N_v=(0,0247) \cdot \Delta T^{(2,61)}$ ) i *b* - eksponencjalnego ( $N_v=(131,555) \cdot \exp(-(25.39)/\Delta T)$ )

Na rysunku 1 zostały naniesione wyniki eksperymentalne z literatury [8] wraz z krzywymi korelacyjnymi, uzyskanymi dzięki programowi komputerowemu STATISTICA. Wyznaczone zostały również parametry krystalizacji dla modelu Oldfielda i eksponencjalnego opisujących kinetykę zarodkowania.

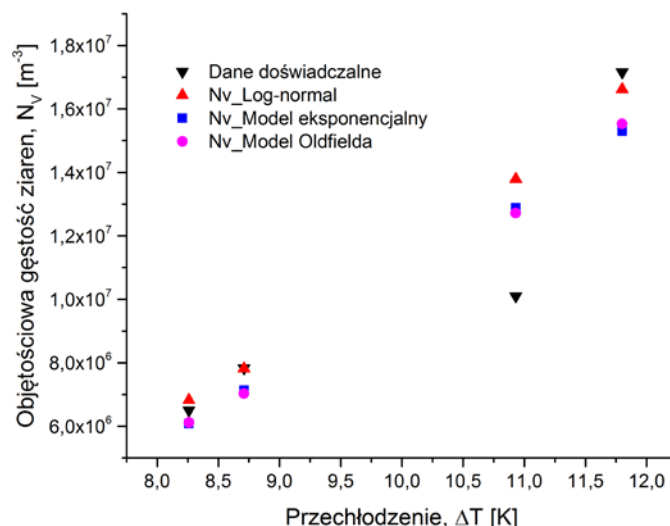
Dla wyznaczenia parametrów w równaniu (3) wykorzystano algorytm opisany w literaturze [7]. Wyniki obliczeń zamieszczono w postaci graficznej na rysunku 2.



**Rys. 2.** Wpływ wielkości podłoża na gęstość prawdopodobieństwa według modelu

logarytmiczno-normalnego 
$$N(d) = \frac{1 \cdot 10^{11}}{1.580 \cdot d \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{[\ln(d) - \ln(2.165 \cdot 10^{-10})]^2}{2 \cdot 1.580^2}\right)$$

Na rysunku 3 zestawiono wyniki eksperymentalne pochodzące z literatury [8] z obliczeniami bazującymi na powyższych modelach zarodkowania. Jak można zauważyć na rysunku 3, modele zarówno Oldfielda, eksponencjalny jak i logarytmiczno-normalny poprawnie opisują zależność gęstości ziaren od przechłodzenia. Wszystkie modele wykazują duże odstępstwo od wyników eksperymentalnych dla przechłodzenia równego około 11 K. Dla pozostałych wartości przechłodzeń model logarytmiczno-normalny wydaje się być bliższy wynikom eksperymentalnych.



**Rys. 3.** Zestawienie wyników doświadczalnych [1] z modelami ujmującymi gęstość ziaren w funkcji przechłodzenia

## Wnioski

1. Dane doświadczalne mogą być poprawnie opisane równaniami (1), (2) i (3).
2. Analiza statystyczna umożliwiła wyznaczenie parametrów krystalizacji dla trzech zależności opisujących kinetykę zarodkowania.
3. Uzupełnione modele zarodkowania o parametry krystalizacji wyglądają następująco:

Model Oldfielda:  $N_V = (0,0247) \cdot \Delta T^{(2,61)}$ ,

Model eksponencjalny:  $N_V = (131,555) \cdot \exp((-25,39)/\Delta T)$ .

Model logarytmiczno-normalny:

$$N(d) = \frac{1 \cdot 10^{11}}{1.580 \cdot d \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{[\ln(d) - \ln(2.165 \cdot 10^{-10})]^2}{2 \cdot 1.580^2}\right)$$

## Podziękowania

Opracowano w ramach projektu nr 11.11.170.318 zad. 1

## Literatura

1. W. Oldfield, Quantitative Approach to Casting Solidification, Freezing of Cast Irons ASM 59 (1966) str. 945-961.
2. M. Górny, Badania modelowe zarodkowania ziaren eutektycznych w żeliwie i ich weryfikacja doświadczalna. Rozprawa doktorska, Kraków 2001.
3. E. Fraś, K. Wienczek, M. Górny and H. Lopez, Theoretical Model for Heterogeneous Nucleation of Grains During Solidification, Material Science and Technology, December 19 (2003) pp. 1653-1659.
4. A. L. Greer, A. M. Bunn, A. Tronche, P. V. Evans, D. J. Bristow, MODELLING OF INOCULATION OF METALLIC MELTS: APPLICATION TO GRAIN REFINEMENT OF ALUMINIUM BY Al-Ti-B, Acta Materialia 48 (2000) pp. 2823-2835.
5. T. E. Quested, A. L. Greer, The effect of the size distribution of inoculant particles on as-cast grain size in aluminium alloys, Acta Materialia 52 (2004) pp. 3859-3868.
6. T. E. Quested, A. T. Dinsdale, A. L. Greer, Thermodynamic modelling of growth-restriction effects in aluminium alloys, Acta Materialia 53 (2005) pp. 1323-1334.
7. J. Lelito, B. Gracz, P. L. Żak, M. Szucki, D. Kalisz, J. Suchy, W. Krajewski, Determination of substrate log-normal distribution in the AZ91/(SiC)<sub>p</sub> composite, Archives of Foundry Engineering (13) 3/2013 pp. 35-38.

8. M. Górný, G. Sikora, Effect of Titanium Addition and Cooling Rate on Primary  $\alpha$ (Al) Grains and Tensile Properties of Al-Cu Alloy, *Journal of Materials Engineering and Performance* 24 3 (2015) pp. 1150-1156.