

Metaliczne materiały kompozytowe w aplikacjach lotniczych (w tym materiały typu Glare)

Politechnika Lubelska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Śląska, Instytut Lotnictwa w Warszawie

Wyniki badań

Analiza cech strukturalnych aluminiowych odlewów szkieletowych z uwzględnieniem kinetyki krzepnięcia

W pracy zaprezentowano metody kształtowania struktury odlewów szkieletowych wykonanych ze stopów AlSi11, co jest istotne z punktu widzenia własności użytkowych odlewów szkieletowych w przyszłościowych zastosowaniach technicznych. Przedstawiono wyniki badań związane są z opracowaniem technologii wytwarzania odlewów szkieletowych oraz dwóch metod kształtowania struktury tych niemonolitycznych konstrukcji o skomplikowanej geometrii. Pierwsza metoda polegała na opracowaniu wytycznych technologicznych parametrów wytwarzania, określeniu korzystnych warunków technologicznych umożliwiających uzyskanie najlepszych własności strukturalnych. Druga metoda polegała na zastosowaniu modyfikatora poprawiającego leśność stopów AlSi11, a co za tym idzie uzyskanie dobrego wypięnienia kanałów rdzenia odlewów szkieletowych i uzyskanie bardziej jednorodnej struktury tych konstrukcji.

Celem badań było określenie wpływu parametrów technologicznych wytwarzania w tym zabiegów modyfikacji na własności strukturalne zamkniętych odlewów szkieletowych. Dążono do uzyskania maksymalnego stopnia rozdrobnienia struktury przy minimalnym jej zróżnicowaniu.

Odlewy szkieletowe wykonano zgodnie z opracowaną technologią wytwarzania. Przedmiotem badań była analiza mikrostruktury niemonolitycznych odlewów. W celu oceny własności strukturalnych przeprowadzono analizę zglądów metalograficznych, analizę ilościową wydzieli Si oraz analizę odległości gałęzi drugorzędowych osi dendrytów DAS roztworu α. Badania wykonano w charakterystycznych obszarach odlewów szkieletowych zróżnicowanych pod kątem szybkości oddawania ciepła.

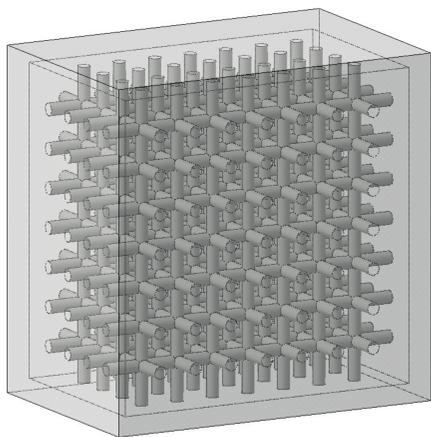
O korzystnych własnościach strukturalnych (dużej jednorodności struktury o możliwie największym stopniu rozdrobnienia) decydują warunki technologiczne wytwarzania w połączeniu z zabiegami modyfikacji. Na podstawie badań potwierdzono możliwość uzyskania korzystnych struktur stopu AlSi11 w zastosowanych warunkach krzepnięcia szkieletu.

W przyszłości autorzy będą dążyli do określenia wpływu innych modyfikatorów poza antymonem powszechnie stosowanych do rozdrobnienia struktury stopów okołoeutektycznych na własności strukturalne odlewów szkieletowych oraz określenia optymalnych parametrów wytwarzania generujących uzyskanie najlepszych własności strukturalnych.

Słowa kluczowe: odlewnicze struktury szkieletowe, krystalizacja, struktura, stopy odlewnicze AlSi11.

Cel i zakres badań

Celem badań było określenie wpływu parametrów technologicznych wytwarzania w tym zabiegów modyfikacji na własności strukturalne zamkniętych odlewów szkieletowych. Dążono do uzyskania maksymalnego stopnia rozdrobnienia struktury przy minimalnym jej zróżnicowaniu. Wirtualny model odlewu próbnego pokazano na rysunku 1.



Rysunek 1. Model wirtualny szkieletowego odlewu próbnego

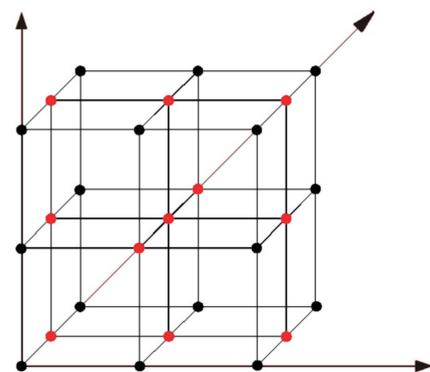
Metodyka badań

Badania doświadczalne zrealizowano według planu eksperymentu Hartleya. Podstawowy plan eksperymentu obejmuje wykonanie 11 doświadczeń (rysunek 2), w którym czynnikami wejściowymi są:

1. Temperatura zalewania, zmieniana w zakresie 953 ± 1013 K
2. Temperatura formy, zmieniana w zakresie 293 ± 373 K
3. Wysokość układu wlewowego, zmieniana w zakresie 230 ± 300 mm

Czynnikami wyjściowymi procesu są:

1. Stopień wypełnienia wnęki formy
2. Cechy geometryczne mikrostruktury odlewu
3. Własności mechaniczne odlewu



Rysunek 2. Hipersześcian trójpoziomowego planu Hartleya

Plan eksperymentu zakłada przyjęcie trzech poziomów czynników sterujących X, tj. minimalnego (-1), centralnego (0) oraz maksymalnego (+1) oraz ich normowanie według następujących zależności:

$$\bar{X} = \frac{X - X_{\min}}{\Delta X} = \frac{2\alpha \cdot (X - X_{\min})}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

$$\Delta X = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{2\alpha} \quad (2)$$

$$\bar{X} = \frac{X_{\max} + X_{\min}}{2} + \alpha(X - X_{\min}) \quad (3)$$

gdzie:

\bar{X} – czynnik sterujący przy normowaniu,

α – wartość centralna czynnika w skali rzeczywistej,

X – czynnik w skali rzeczywistej,

ΔX – krok zmian czynnika sterowanego,

$\alpha = 1$, dla planu opartego na hipersześcianie.

1. Obliczenie wartości centralnych (wartości czynników wejściowych na poziomie 0) dla temperatury zalewania, temperatury formy oraz wysokości układu wlewowego:

$$\bar{X}_{T_{zal}} = \frac{1013 \text{ K} + 953 \text{ K}}{2} = 983 \text{ K}$$

$$\bar{X}_{T_{formy}} = \frac{373 \text{ K} + 293 \text{ K}}{2} = 333 \text{ K}$$

$$\bar{X}_h = \frac{300 \text{ mm} + 230 \text{ mm}}{2} = 265 \text{ mm}$$

2. Obliczenie jednostek zmienności dla temperatury zalewania, temperatury formy oraz wysokości układu wlewowego:

$$\Delta X_{T_{zal}} = \frac{1013 \text{ K} - 953 \text{ K}}{2 \cdot 1} = 30 \text{ K}$$

$$\Delta X_{T_{formy}} = \frac{373 \text{ K} - 293 \text{ K}}{2 \cdot 1} = 40 \text{ K}$$

$$\Delta X_h = \frac{300 \text{ mm} - 230 \text{ mm}}{2 \cdot 1} = 35 \text{ mm}$$

3. Kodowanie czynników dla temperatury zalewania, temperatury formy oraz wysokości układu wlewowego:

$$\bar{X}_{T_{zal}} = \frac{X - 983 \text{ K}}{30 \text{ K}} = x_1$$

$$\bar{X}_{T_{formy}} = \frac{X - 333 \text{ K}}{40 \text{ K}} = x_2$$

$$\bar{X}_h = \frac{X - 265 \text{ mm}}{35 \text{ mm}} = x_3$$

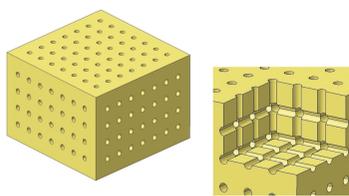
Temperatura zalewania i formy oraz wysokość układu wlewowego spełniają warunek symetryczności na wszystkich trzech poziomach czynnika sterującego.

Macierz planowania eksperymentu zamieszczono w tabelicy 1.

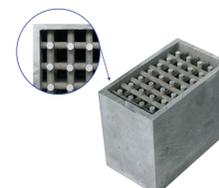
Tabela 1. Macierz planowania eksperymentu oparta na hipersześcianie

Lp.	x ₁	x ₂	x ₃
1.	+	+	+
2.	+	-	-
3.	-	+	-
4.	-	-	+
5.	+	0	0
6.	-	0	0
7.	0	+	0
8.	0	-	0
9.	0	0	+
10.	0	0	-
11.	0	0	0

Do wykonania odlewów próbnych zastosowano okołoeutektyczne stopy aluminium (AlSi11) [2], gdyż z założenia krystalizują w drobnoziarnistych strukturach [3, 4, 5]. Stopy uzupełniono dodatkami antymonu. Antymon należy do grupy pierwiastków i związków modyfikujących strukturę stopów Al-Si [6, 7, 8, 9]. Jednak w wielu przypadkach jego działanie jako modyfikatora jest niezadawalające.



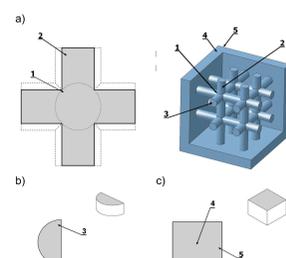
Rysunek 3. Model rdzenia



Rysunek 4. Przykładowy zamknięty szkieletowy odlew aluminiowy z usuniętymi 3 ściankami zamykającymi, stop AlSi11 modyfikowany, 125x70x125, T_{zal} 953 K, T_{formy} 293 K, h_w 230 mm (h uk. wlew. nad poziomem odlewu = 105 mm)

Analiza strukturalna odlewów

Przeprowadzono jakościowe i ilościowe badania mikrostruktury odlewów próbnych [12, 13]. Analizowane zglądy były nietrawione

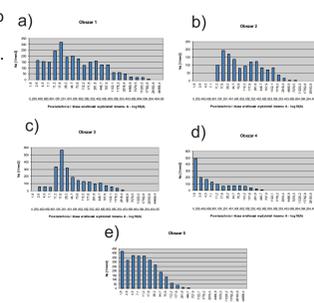


Rysunek 5. Charakterystyczne obszary, w których porównanomiękrostruktury:
1- narożnik węzła szkieletu;
2- przekrój wzdłużny łącznika szkieletu;
3- przekrój poprzeczny łącznika szkieletu;
4- centralna część narożnika ściany zamykającej szkielet;
5- zewnętrzna powierzchnia narożnika ściany zamykającej szkielet [13]
Składnikami strukturalnymi stopu są: roztwór krzemu w aluminium oraz kryształy eutektycznego krzemu (- Si) w obszarach międzydendrytycznych.

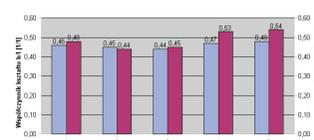
Rysunek 6. Mikrostruktury obszarów odlewu szkieletowego próbki 4 (AlSi11, T_{zal} 953 K, T_{formy} 293 K, h = 300 mm) przy powiększeniu 20x: a- zewnętrzna powierzchnia ściany zamykającej szkielet, b- centralna część ściany zamykającej; c, d – przekrój poprzeczny; e- przekrój wzdłużny łącznika szkieletu, f- narożnik węzła szkieletu, oznaczenia cyfrowe (1+5) odpowiadają opisowi na rysunku

Analizowano obrazy binarne mikrografii. Badano zmienność: wielkości powierzchni (P), obwodów (A), szerokość (B) i długość (L) wydzieli krzemu. We wszystkich analizowanych obszarach badanych odlewów określono maksymalne, minimalne oraz średnie wartości parametrów stereologicznych na podstawie, których wyznaczono stopień rozdrobnienia struktury [5]. Wartości parametrów stereologicznych dla wybranej próbki przedstawiono w tabelicy 3.

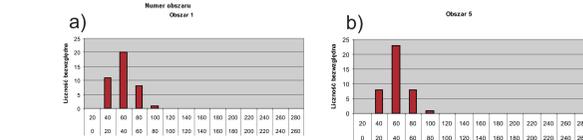
Wyznaczono współczynniki kształtu (B/L) i (P/A) oraz parametr Na określający liczbę wydzieli krzemu na powierzchni 1 mm². Na rysunku 7 przedstawiono histogram – opisujące ilość wydzieli krzemu w 1 mm² dla skrajnych obszarów wybranej próbki szkieletowego.



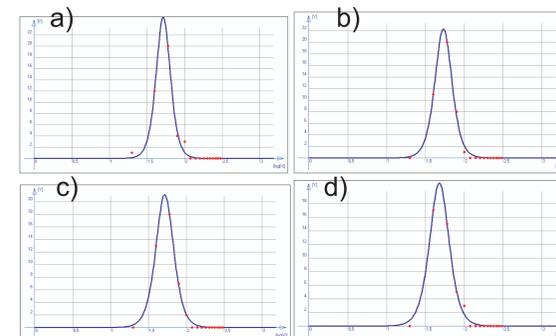
Rysunek 7. Ilość wydzieli krzemu Na w klasach wielkości ich powierzchni (AlSi11, T_{zal} 953 K, T_{formy} 373 K, h = 230 mm)



Rysunek 8. Współczynniki kształtu B/L oraz P/A przykładowych odlewów szkieletowych dla poszczególnych obszarów odlewu (1 + 5): próbka 2 (AlSi11, T_{zal} 1013K, T_{formy} 293K, h = 230 mm);



Rysunek 9. Rozkład odległości wtórnych osi dendrytów dla analizowanych obszarów – próbka 5 (AlSi11, T_{zal} 1013K, T_{formy} 333K, h = 265 mm)



Rysunek 10. Funkcyjna, aproksymowana liczebność bezwzględna obiektów [1/1] w zależności od logarytmu wyznaczonej wielkości DAS [μm] dla obszarów o najmniejszych DAS badanych odlewów:
a) próbka 1 (T_{zal} 1013K, T_{formy} 373K, h = 300);
b) próbka 5 (T_{zal} 1013K, T_{formy} 333K, h = 265 mm mm;
c) próbka 10 (T_{zal} 983K, T_{formy} 333K, h = 230 mm;
d) próbka 11 (T_{zal} 983K, T_{formy} 333K, h = 265 mm)

Aproksymacja została przeprowadzona przy wysokiej wartości współczynnika korelacji – R dla analizowanych obszarów o najmniejszych odległościach DAS badanych odlewów szkieletowych.

Tabela 6. Wartości szybkości chłodzenia (v_c), szybkości przyrostu pionowej składowej gradientu temperatury (v_g) oraz szybkości względnej krystalizacji

Numer odlewu	v _c [K/s]	v _g [K/cm s]	pr [cm]
7	0,453 ± 0,814	0,159 ± 0,380	2,88 ± 3,38
8	3,247 ± 3,291	3,029 ± 3,091	2,2 ± 2,204
9	3,181 ± 3,689	2,935 ± 3,663	2,165 ± 2,211
10	3,635 ± 5,477	3,571 ± 6,637	2,060 ± 2,170
11	3,396 ± 3,814	3,231 ± 3,842	2,156 ± 2,191

Wyniki badań
Należy stwierdzić, że na podstawie doświadczeń z metodą ATDG stwierdzono istotny wpływ temperatury zalewania na parametry kinetyki krystalizacji, zatem hipotetycznie jest to skuteczna droga kształtowania struktury i mechanicznych własności szkieletów pod warunkiem precyzyjnego doboru materiałów formierskich. Biorąc pod uwagę ścisły związek DAS z własnościami wytrzymałościowymi istnieje możliwość uzyskiwania atrakcyjnych własności mechaniczno-postaciowych w odlewach szkieletowych.

Tabela 5. Zestawienie wyników badań mikrostrukturalnych

Numer próbki	$\frac{B}{L} [1]$	$\frac{P}{A} [1]$	DAS [μm]
1	0,42 – 0,51	0,47 – 0,60	47,6 – 51,6
2	0,44 – 0,48	0,44 – 0,54	54,1 – 69,7
3	0,41 – 0,46	0,81 – 0,93	116,2 – 188
4	0,31 – 0,45	0,83 – 0,99	96,6 – 120
5	0,45 – 0,52	0,47 – 0,54	49,1 – 50,2
6	0,39 – 0,44	0,48 – 0,56	44,1 – 59,7
7	0,40 – 0,52	1,07 – 12,27	117 – 164
8	0,45 – 0,51	0,48 – 0,56	52,2 – 52,6
9	0,39 – 0,43	0,47 – 0,56	49 – 53,3
10	0,44 – 0,46	0,47 – 0,55	39 – 49
11	0,40 – 0,48	0,50 – 0,55	48 – 51,3

Wyniki analizy strukturalnej

Na podstawie wyników przeprowadzonych analiz mikrostruktury dokonano porównania badanych próbek (tabela 5). Celem było wytypowanie próbek o najmniejszym zróżnicowaniu stopnia rozdrobnienia struktury oraz o najmniejszych wydzieleniach krzemu.

$$DAS = 10,89 \cdot v_c^{-0,589} \cdot v_g^{-0,11} \cdot pr^{-0,11} \quad [K/s]$$

$$DAS = 80,87 \cdot v_c^{-0,589} \cdot v_g^{-0,11} \cdot pr^{-0,11} \quad [K/cm s]$$

$$DAS = 94,79 \cdot pr^{-1,5631} \cdot pr^{-0,56} \quad [cm]$$

$$v_c = \frac{P \cdot DAS}{10,89} \quad [K/s]$$

$$v_g = \frac{P \cdot DAS}{80,87} \quad [K/cm s]$$

$$pr = \frac{DAS \cdot 156,31}{94,79} \quad [cm]$$

Wnioski

- Potwierdzono możliwość uzyskania korzystnych struktur stopu AlSi11 w zastosowanych warunkach krzepnięcia szkieletu.
- Przeprowadzone badania umożliwiają opracowanie wytycznych technologicznych procesu wytwarzania odlewów szkieletowych oraz określenie związków technologicznych czynników wytwarzania ze strukturą.
- Badania mikrostrukturalne wykazały, że próbka 5 (AlSi11, T_{zal} 1013K, T_{formy} 333K, h = 265 mm) posiada najlepsze własności strukturalne (najmniejsze zróżnicowanie stopnia rozdrobnienia struktury przy największym rozdrobnieniu wydzieli krzemu).

Wskaźniki realizacji celów projektu

Zgłoszenie patentowe

- M. Cholewa: Zgłoszenie patentowe nr P-384605 "Zbrojenie kompozytu i sposób odlewania niemonolitycznego zbrojenia oraz kompozytu"