

## WARUNKI WYTWARZANIA I POSTAĆ GEOMETRYCZNA ODLEWÓW SZKIELETOWYCH

M. DZIUBA<sup>1</sup>, M. KONDRACKI<sup>2</sup>, M. CHOLEWA<sup>3</sup>,  
Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i  
Biomedycznych, Zakład Odlewnictwa,  
Polska, 44-100 Gliwice, ul. Towarowa 7

### STRESZCZENIE

Przedstawiono dobór geometrii odlewu szkieletowego przeznaczonego do badań modelowych, symulacji zalewania i krzepnięcia oraz własności mechanicznych. Porównano wpływ ciśnienia metalostatycznego stopu aluminium i żeliwa na zapełnianie wnęki formy odlewniczej. Przedstawiono różnice w technologicznych własnościach badanych stopów na wypełnienie wnęki formy. Wykazano wpływ innych czynników poza ciśnieniem na uzyskanie odlewu szkieletowego.

*Key words: cellular materials, core, skeleton castings.*

### 1. WPROWADZENIE

W założeniu odlewy szkieletowe powinny spełniać eksploatacyjne wymagania pośrednie między odlewami monolitycznymi a pianami metalicznymi i gazarami. Cechami charakterystycznymi prezentowanych odlewów szkieletowych są w szczególności: tradycyjna technika odlewnicza oparta na rozbudowanym geometrycznie rdzeniu, odlewanie grawitacyjne wykorzystujące ciśnienie metalostatyczne, geometryczna powtarzalność komórek szkieletu, dowolność kształtu odlewu. Techniki wytwarzania materiałów porowatych wymagają specjalistycznego sprzętu i są drogie, a otrzymywane odlewy posiadają losową geometrię porów [1÷14], co posiada uzasadnienie przy niewielkich wymiarach porów. Przy wymiarach komórek odlewów szkieletowych na poziomie kilku mm do kilku cm wydaje się uzasadnione dążenie do powtarzalności komórkowej. Wymiary komórki są powiązane z wymiarami elementów

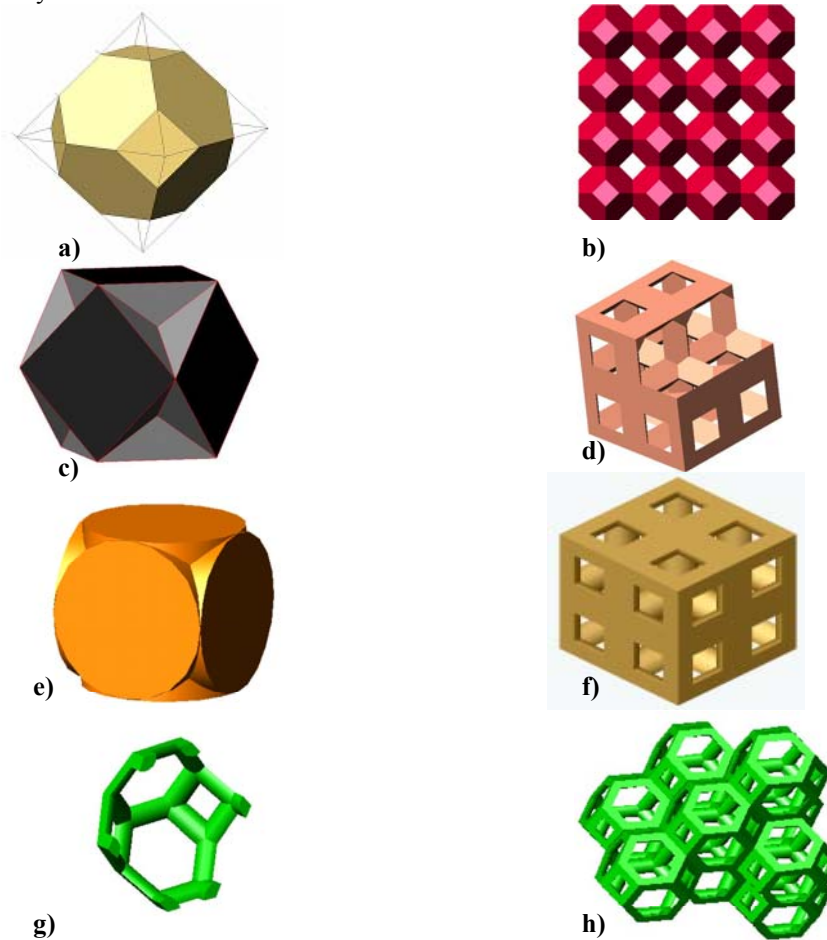
---

<sup>1</sup> mgr inż., [maria.dziuba@polsl.pl](mailto:maria.dziuba@polsl.pl)

<sup>2</sup> dr inż., [marcin.kondracki@polsl.pl](mailto:marcin.kondracki@polsl.pl)

<sup>3</sup> dr hab. inż., [miroslaw.cholewa@polsl.pl](mailto:miroslaw.cholewa@polsl.pl)

tworzących szkielet tzw. łączników. Zastosowanie rdzeni wymusza uzyskanie w odlewie maksymalnego prześwitu między komórkami, co umożliwiłoby łatwe usunięcie rdzenia odtwarzającego komórki w przestrzeni odlewu. Na rys. 1 pokazano geometrię analizowanych komórek szkieletu.



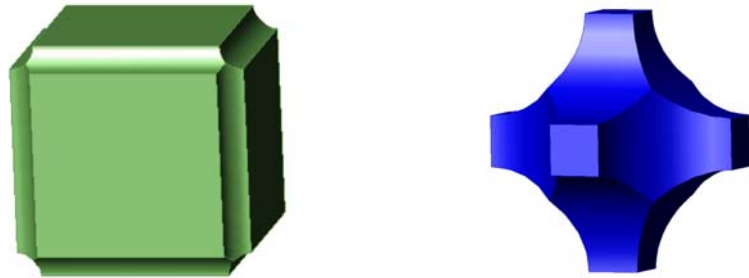
Rys. 1. Budowa odlewów szkieletowych, b),c),e) – węzły, b),d),f),g),h) – struktura komórek.  
Fig. 1. Skeleton castings structure b),c),e) – nodes, b),d),f),g),h) – cell structure.

## 2. METODYKA BADAŃ, WYNIKI I ICH ANALIZA

Spośród przedstawionych geometrii odlewu szkieletowego do wykonania odlewów próbnych wytypowano geometrię pokazaną na rys. 1 e i f. Korzystnymi elementami geometrii są: prostopadłość łączników komórki, kołowy przekrój łączników, prostota

wykonania rdzenia, znaczny prześwit ułatwiający usuwanie rdzenia oraz uproszczone wnioskowanie o własnościach odlewu na podstawie analiz symulacyjnych.

Wykonanie odlewu według zaproponowanej geometrii wiąże się z doбором proporcji między średnicą kołowego łącznika komórki i jej wymiarem gabarytowym. Na rys. 2 pokazano skrajne, technologicznie uzasadnione proporcje wnętrza komórki rdzenia, złożonego z identycznych komórek elementarnych opartych na sześcianie.



Rys. 2. Elementarna część rdzenia oparta na sześcianie, odtwarzająca komórkę szkieletu **a)** bryła o promieniu krzywizny  $r = 0,1 \cdot a$ , **b)** bryła o  $r = 0,4 \cdot a$  ( $a$  – krawędź sześcianu).  
Fig. 2. Elementary core based on cube reproducing the skeleton cell. **a)** solid with radius  $r = 0,1 \cdot a$ , **b)** solid with radius  $r = 0,4 \cdot a$  ( $a$  – cube edge length).

Wyznaczono wzór na objętość przestrzeni znajdującej się dookoła jednej komórki rdzeniowej - przestrzeń wypełniona metalem i wzór na objętość porów w odlewie (rysunek 3, równanie 1 i 2):

$$V_m = \frac{21}{160} \cdot \pi \cdot a^3 \cdot n \quad V_m = 8,4 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot n \quad [\text{mm}^3] \quad (1)$$

$$V_p = a^3 \cdot \left(1 - \frac{21 \cdot \pi}{160}\right) \cdot n \quad V_p = r^3 \cdot (64 - 8,4 \cdot \pi) \cdot n \quad [\text{mm}^3] \quad (2)$$

gdzie:

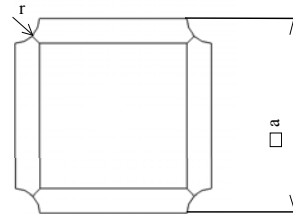
$V_m$  – objętość metalu w odlewie

$V_p$  – objętość porów w odlewie

$a$  – wielkość elementu rdzenia użytego na odlew

$r$  – wartość promienia elementu rdzenia użytego na odlew

$n$  – ilość elementów rdzenia użytych do wykonania odlewu.



Rys. 3. Charakterystyczne wymiary osiemnastościanu „hydraulicznego”

Fig. 3. Characteristic dimensions of hydraulic octadecahedron

Wykonano odlewy ze stopów znacznie różniących się zdolnością wypełniania wnętrza formy i lejunością. Zastosowano żeliwo szare EN – GJL – 100 oraz eutektyczny stop AlSi11. W tych samych warunkach w układzie: odlew AlSi11 – forma powstaje

ciśnienie metalostatyczne mniejsze niż przy żelwie, co wynika z proporcji gęstości stopów.

Do badań wstępnych dobrano wysokość układu wlewowego, który zapewniał niecałkowite wypełnienie wnęki formy, co umożliwiło określenie wpływu ciśnienia metalostatycznego na zdolność do penetracji metalu w kanały rdzenia wypełniającego wnękę formy. Doświadczenie przeprowadzono w następujących warunkach:

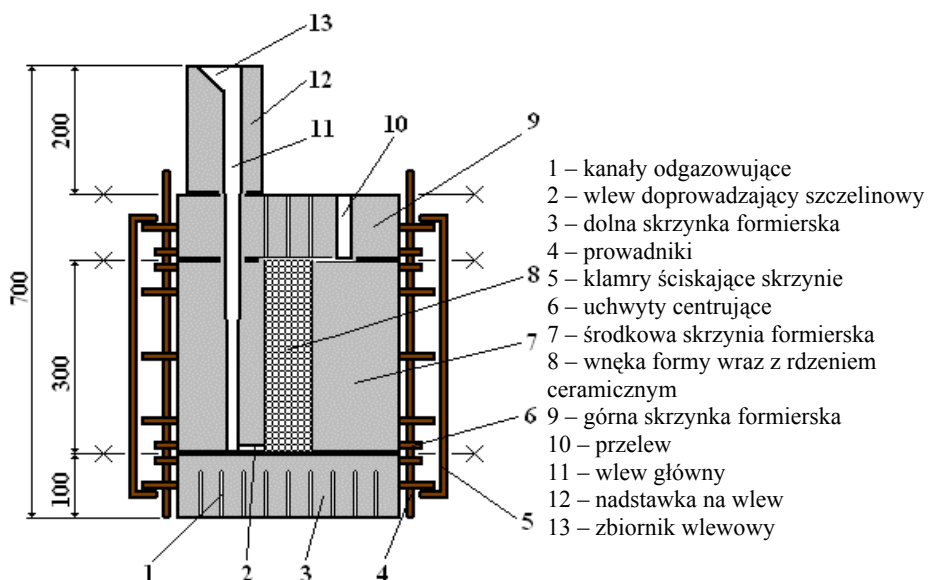
- wysokość odlewu:  $H_o=300$  mm
- wymiary podstawy: 70x70 mm
- wielkość komórki szkieletu:  $a = 10$  mm
- promień łącznika szkieletu  $r = 5$  mm
- wysokość układu wlewowego dla AlSi11  $h=600$  mm, wysokość układu wlewowego dla żeliwa  $h=400$  mm
- temperatura zalewania:  $T_z=1013$  K dla AlSi11, dla żeliwa  $T_z=1743$  K
- zakres wartości ciśnienia metalostatycznego na wysokości odlewu:  $\Delta p = (7,8\div 15,6)$  kPa dla AlSi11, dla żeliwa:  $(7\div 28)$  kPa
- lejność dla AlSi11  $L = 14 - 1013$  K, dla żeliwa  $L = 28 - 1733$  K

Dobór składu stopów miał na celu uzyskanie jak najlepszej lejności. Żeliwo EN – GJL – 100, PN – EN 1561:2000 jest wykorzystywane na odlewy cienkościennie. Przyjęto górne graniczne zawartości węgla, krzemu i fosforu oraz dolne zawartości siarki i manganu oraz wprowadzono 0,5% dodatek antymonu. Żeliwo o wyższej zawartości fosforu (powyżej 0,5%, nawet do 1,2%) jest rzadkoplątne i dobrze wypełnia cienkościennie i skomplikowane przestrzenie wnęki formy. Przekroczenie granicy 1,2% powoduje szereg niekorzystnych zjawisk jak: nadmierna grafityzacja stopu, rozrost ziaren ferrytu oraz wydzielanie się fosforków [15, 16]. Wprowadzony antymon jest składnikiem zmniejszającym rozpuszczalność fosforu w żelazie, co poprawia lejność przez ułatwienie tworzenia steadytu [15, 16]. Przyjęto następujący skład chemiczny żeliwa na odlewy próbne: 3,5 %C; 2,9 %Si; 0,5 %Mn; 0,65 %P ;0,1 %Sb.

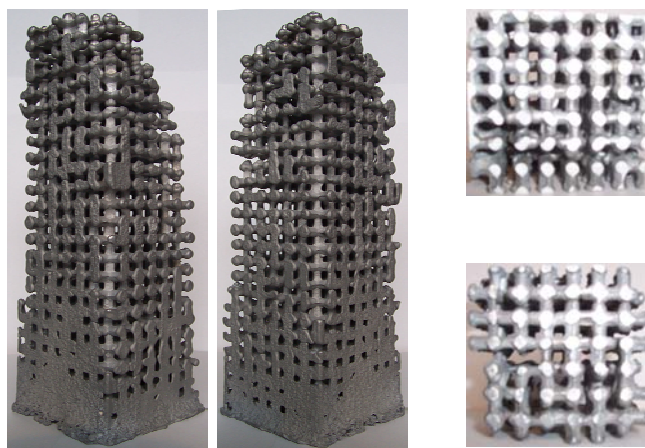
Do wykonania odlewu aluminiowego zastosowano stop EN AC-AlSi11, PN EN-1706:2001. Do modyfikacji użyto strontu i antymonu. Modyfikacja stopów Al-Si strontem powoduje zwiększenie ich lejności, lecz powoduje także zwiększenie ich zagazowania. Modyfikacja stopów Al-Si antymonem nadaje im bardzo dobrą lejność nie powodując zagazowania. [17]. Zastosowano dodatek Sr w ilości 0,04% oraz Sb w ilości 0,4% masy wsadu.

Odlewy próbne wykonano w formach z rdzeniem, których konstrukcję pokazano na rys. 4. Dla odlewu aluminiowego przyjęto znacznie wyższy układ wlewowy ( $\Delta h=200$  mm). Pomimo to uzyskano mniejszy stopień wypełnienia wnęki formy metalem w porównaniu do odlewu żeliwnego. Na rys. 5 pokazano uzyskany odlew aluminiowy. Widoczne jest asymetryczne niedopełnienie wnęki formy. Większa lejność żeliwa pozwoliła na uzyskanie znacznie lepszego wypełnienia wnęki formy, co na obecnym etapie badań skłania do ukierunkowania badań w stronę żeliwa. Dla potrzeb szczegółowej analizy, także dla uzyskania danych do symulacji zalewania opis ilościowy oparto na analizie poszczególnych poziomów komórek opisując wypełnienie łączników i węzłów. Na rys. 6 pokazano wpływ ciśnienia metalostatycznego na

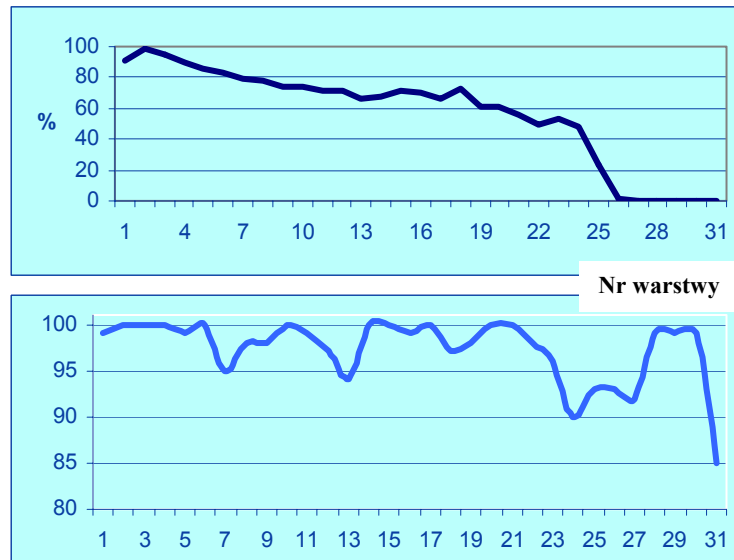
wypełnienie metalem kolejnych poziomów wnętrza formy. Każdy poziom odpowiada pojedynczej warstwie komórek szkieletu.



Rys. 4. Przykładowa forma do wykonaniu szkieletowego odlewu aluminiowego.  
 Fig. 4. Example of a mould for skeleton Al casting.



Rys. 5. Przykładowy aluminiowy odlew szkieletowy i charakterystyczne przekroje.  
 Fig. 5. Example of Al skeleton casting with characteristic sections.



Rys. 6. Procentowy udział objętości metalu na kolejnych warstwach szkieletów,  
a) odlew aluminiowy, b) odlew żeliwny.

Fig. 6. Fraction (%) of metal volume on following skeleton layers,  
a) Al casting, b) iron casting.

### 3. OMÓWIENIE WYNIKÓW

Uzyskane wyniki świadczą o odmiennych dla obu badanych stopów czynnikach wpływających na przebieg procesu zapełniania wnęki formy. W odlewie ze stopu aluminium widoczny jest, choć nieliniowy, spadek zapełniania kolejnych warstw odlewu przy malejącym ciśnieniu. W przypadku wyłącznego wpływu ciśnienia na zapełnienie wykres byłby malejącą zależnością liniową. Na krzywoliniowy charakter zależności wpływ prawdopodobnie ma także malejąca temperatura czoła metalu, co potwierdza wypukły, sferyczny kształt ostatnich zalanych fragmentów kanałów odtwarzających łączniki szkieletu. W przypadku odlewu żeliwnego, poza wypełnieniem części ostatniej warstwy, zalane zostały także kanały odpowietrzające w górnej części wnęki formy oraz przelew. Wykres zapełniania formy wykazuje „pulsację” w funkcji wysokości odlewu, co może być spowodowane oporem gazów, które rozszerzając się przed frontem metalu nie zostały wyprowadzone na zewnątrz z odpowiednią szybkością. Powierzchnie czołowych niedolanych łączników są wklęsłe i sferyczne, a w ich sąsiedztwie występują cienkie zalewki. Wyniki planowanych analiz symulacyjnych pozwolą ocenić wpływ temperatury, kształtującej lepkość stopu oraz wpływ ciśnienia metalostatycznego. Połączenie uzyskanych wyników z obliczeniami symulacyjnymi pozwoli na wydzielenie wpływu połączonych czynników, jakimi są utlenianie strugi metalu oraz wpływ gazów na zapełnienie wnęki formy. Na podstawie

przeprowadzonych badań potwierdzono możliwość wytwarzania szkieletów tradycyjnymi metodami odlewniczymi. Konieczne jest określenie granic stosowania metody. Można wstępnie ustalić hierarchię czynników, które poza ciśnieniem wpływają na jakość wytwarzanych odlewów szkieletowych. Dzięki uzyskanym wynikom można wyznaczyć kierunki dalszych badań. Należy, zatem określić wpływ kształtu odlewu na jakość wypełnienia formy oraz opracować wytyczne do projektowania układów wlewowych oraz opracować sposoby kształtowania struktury odlewów.

#### LITERATURA

- [1] Darlak P. Dudek P.: *Materiały wysokoporowate – metody wytwarzania i zastosowanie*, Kompozyty – Nauka i Praktyka, 1/2004, s. 3-17.
- [2] Banhart J., Fleck N.A., Mortensen A., *Cellular Metals: Manufacture Properties and applications*, Berlin Germany 2003
- [3] [www.msm.cam.ac.uk](http://www.msm.cam.ac.uk)
- [4] [www.aimcomposites.com](http://www.aimcomposites.com)
- [5] [www.ifam.fraunhofer.de](http://www.ifam.fraunhofer.de)
- [6] [www.cospal.com](http://www.cospal.com)
- [7] [www.porvair.com](http://www.porvair.com)
- [8] [www.spp-metallschaume.uni-erlangen.de](http://www.spp-metallschaume.uni-erlangen.de)
- [9] [www.miltechinternational.com](http://www.miltechinternational.com)
- [10] [www.metalfoam.net](http://www.metalfoam.net)
- [11] Simańczyk F., *Metallic foams – ultra light materials for structural applications*, Inż. Mater., 5/2001, s. 823-828.
- [12] Sobczak J., *Metallic foams on the example of composite structures*, Arch. Technol. Masz. i Autom., nr spec. 2001, s. 161-169.
- [13] Sobczak J., *Gazary – metalowe materiały kompozytowe zbrojone gazami*, B. I. O., 1/99, s. 3-18.
- [14] Cholewa M.: *Kształtowe odlewy z pian kompozytowych*, Arch. Odlewn., v 3, nr 9 Katowice 2003
- [15] Podrzucki C. *Żeliwo – struktura, właściwości, zastosowanie*. Wydawnictwo ZG STOP, Kraków 1991.
- [16] Sakwa W. B. *Żeliwo szare*. Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej, Gliwice 1972.
- [17] Pietrowski S., *Siluminy*, Wyd. Pol. Łódź., Łódź 2001

**MANUFACTURING CONDITIONS AND GEOMETRY OF SKELETON  
CASTINGS****SUMMARY**

In this work geometry selection for model skeleton casting was shown. This model was used for properties investigation and numerical simulation. Comparison of metalostatic pressure was conducted for Al alloy and cast iron. Influence of technological properties of studied alloys on cavity filling and skeleton casting creation was indicated.

Recenzował Prof. Jan Szajnar