

**PROCES WYKONANIA I MECHANICZNE WŁAŚCIWOŚCI  
ODLEWANYCH, UPORZĄDKOWANYCH KONSTRUKCJI  
KOMÓRKOWYCH ZE STOPU Al-Si**

**MANUFACTURING PROCESS AND MECHANICAL PROPERTIES OF  
ORDERED, CELLULAR CONSTRUCTIONS CAST FROM Al-Si ALLOY**

*Jarosław Piekło\*, Stanisław Pysz\*\*, Marcin Małyszka\*\**

*\*Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Odlewnictwa, Katedra Inżynierii Procesów Odlewniczych,  
ul. Reymonta 23, 30-059 Kraków*

*\*\*Instytut Odlewnictwa, Centrum Projektowania i Prototypowania,  
ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

**Streszczenie**

*Uporządkowane konstrukcje komórkowe są ważnym elementem konstrukcyjnym stosowanym w przemyśle zbrojeniowym, lotniczym i samochodowym. Zastosowanie technik szybkiego prototypowania (rapid prototyping) oraz technologii sterujących procesami krzepnięcia umożliwia wykonanie odlewów o konstrukcji komórkowej. W niniejszym artykule przedstawiono wybrane zagadnienia związane z wykonaniem tego typu odlewu oraz badaniami wytrzymałościowymi i budową modelu numerycznego do wyznaczania naprężeń i odkształceń pod wpływem zgniotu wynoszącego 50%, za pomocą metody elementów skończonych MES.*

*Słowa kluczowe: konstrukcja komórkowa, odlew, szybkie prototypowanie, stop Al-Si, model numeryczny*

**Abstract**

*Ordered cellular constructions are an important structural element used in armaments, aerospace and automotive industry. The use of Rapid Prototyping technique and control of solidification process allow making castings characterised by such constructions. This article discusses selected issues related with the manufacture of castings of this type and with the mechanical tests and construction of a numerical model to determine the stress/ strain behaviour under the effect of cold work for 50% thickness, using finite element method (FEM).*

*Key words: cellular constructions, cast, rapid prototyping, Al-Si alloy, numerical model*

## Wstęp

Konstrukcje komórkowe uporządkowane typu *sandwich*, dzięki dużej zdolności do deformacji plastycznej przy zachowaniu stałej, stosunkowo małej wartości naprężeń, mają doskonałe właściwości rozpraszające energię uderzenia i są stosowane jako absorbery energii w wielu konstrukcjach poddanych ekstremalnym warunkom obciążeń i uderzeń balistycznych, zachowując przy tym w miarę nienaruszoną konstrukcję swojej postaci [1, 2].

Cechą charakterystyczną tej konstrukcji jest umieszczenie pomiędzy dwoma, najczęściej równoległymi płytami, rdzenia złożonego z powtarzalnych kształtem komórek, które stanowią regularne kompozycje geometryczne. Szeroko znane i stosowane są topologie zamknięte o budowie heksagonalnej, falistej, trapezowej, trójkątnej czy belkowej, stanowiąc nieodłączną część konstrukcji wykorzystywanych w przemyśle lotniczym, zbrojeniowym i samochodowym. Szereg publikacji [3, 4] opisuje ich budowę i różnorodne sposoby wytwarzania. Interesującą jest metoda precyzyjnego odlewania, która wykorzystuje szybkie prototypowanie (*rapid prototyping*) do wykonania modelu.

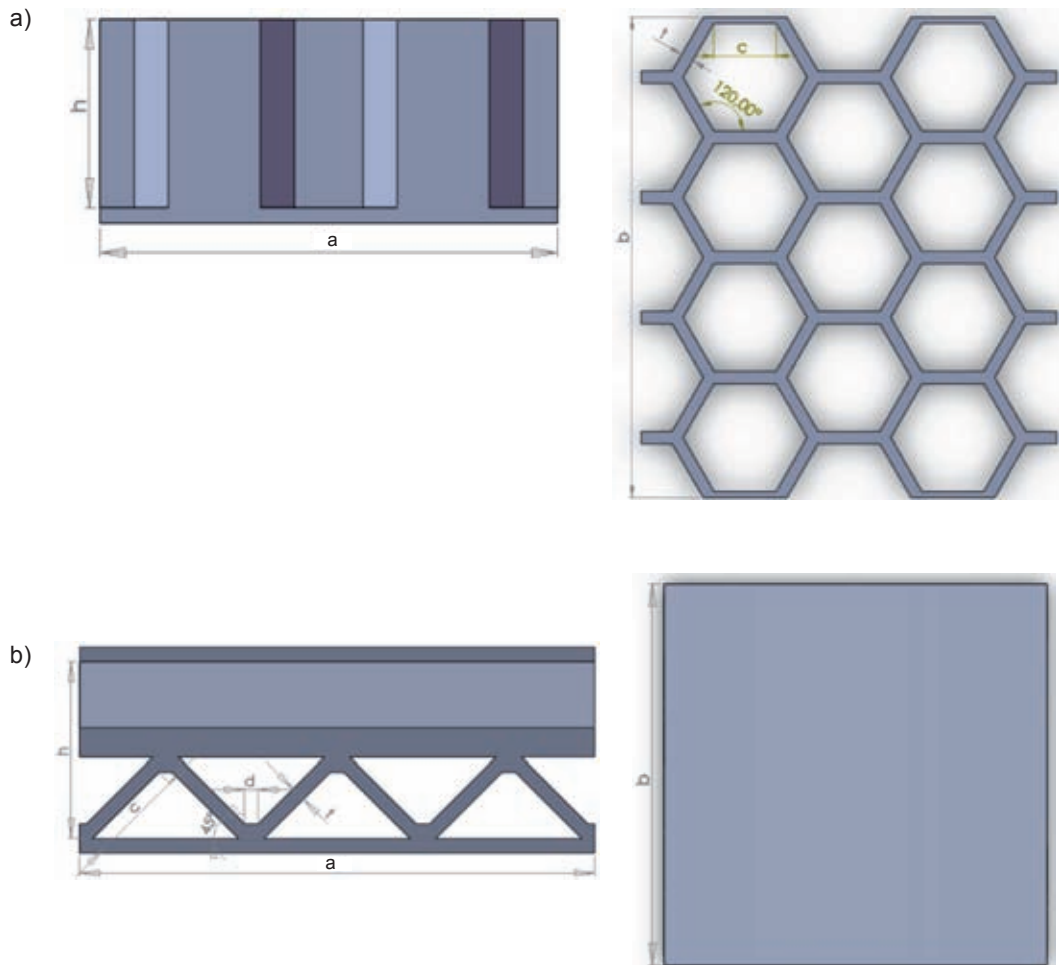
## Przygotowanie modelu za pomocą technik szybkiego prototypowania (*Rapid Prototyping*)

Przygotowanie procesu technologicznego wykonania odlewu o konstrukcji komórkowej wiąże się z koniecznością zachowania dokładności wymiarowej. Dzięki zastosowaniu technik szybkiego prototypowania oraz programów *CAD* spełnienie powyższego wymogu jest w znacznej mierze ułatwione. Pierwszym etapem przygotowania technologii jest wybór kształtu komórki podstawowej, która będzie stanowić bazę dla rdzenia. Wyselekcjonowane zostały dwa kształty o geometrii heksagonalnej i trapezowej (rys. 1), a projekt brył został przygotowany przy użyciu programu *SolidWorks*. Wymiary konstrukcji komórkowych podano w tabeli 1.

Tablela 1. Wymiary poszczególnych konstrukcji komórkowych, mm

Table 1. Dimensions of individual constructions, mm

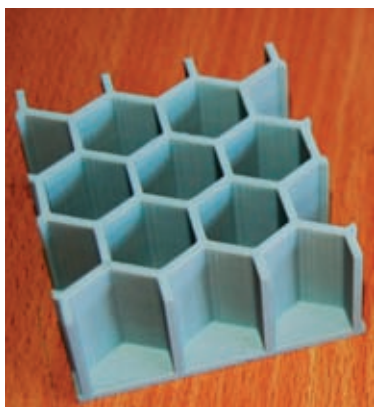
Nazwa konstrukcji komórkowych	a	b	h	c	t	d
Heksagonalna	67	77	24	10	2	1,8
Trapezowa	70	70	30	12,8	2	



Rys. 1. Kształty konstrukcji komórkowych: a - plaster miodu, b - trapez

Fig. 1. Construction shapes: a - trapezoidal, b - honeycomb

Geometrie brył zostały zapisane w formacie \*.stl i importowane do urządzenia RP – FDM Titan, gdzie za pomocą odpowiedniego oprogramowania nastąpił podział brył na warstwy w płaszczyźnie x–y. Zaprogramowano również przebieg drogi dysz, grubość poszczególnych warstw i budowanej ścianki. Urządzenie Titan działa w oparciu o technikę FDM (*Fused Deposition Modeling*). Metoda ta polega na addytywnym nanoszeniu warstwami materiału modelowego i podporowego, który występuje w postaci upłynnionej przypominającej nitki. Po nałożeniu jednej warstwy, kolejne nanoszone są po obniżeniu stołu roboczego o jedną grubość warstwy. Do budowy modelu wykorzystano materiał termoplastyczny ABS (akrylonitrylo-butadien-styren). Cykl powtarzany jest do odtworzenia całej bryły \*.stl. Gotowe modele (rys. 2) podlegały dodatkowej obróbce polegającej na usunięciu materiału podporowego.



a)



b)

Rys. 2. Modele otrzymane metodą FDM: a - konstrukcja komórkowa heksagonalna, b - trapezowa

Fig. 2. Models obtained by FDM: a - hexagonal structure, b - trapezoidal structure

Dodatkowo, dla modelu heksagonalnego przygotowany został rdzeń (rys. 3), którego zadaniem było ułatwienie usunięcia modelu woskowego z matrycy silikonowej. Rdzeń przygotowany został na urządzeniu *3D Printer Z-Corporation*.

Technika *3D printing* polega na warstwowym nanoszeniu spoiwa na proszek. Proces przebiega w dwóch komorach. W jednej znajduje się luźny proszek, który za pomocą lemieszki przenoszony jest warstwami do komory drugiej, w której następuje właściwe spajanie.

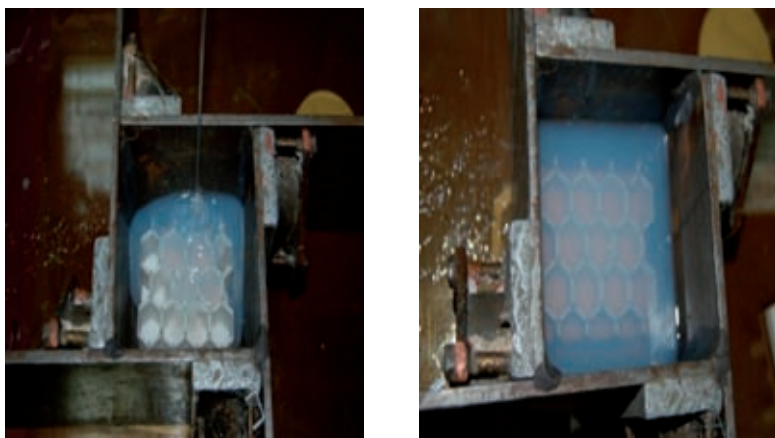


Rys. 3. Rdzeń dla modelu heksagonalnego wykonanego metodą 3D printing

Fig. 3. Core for hexagonal model made by 3D printing

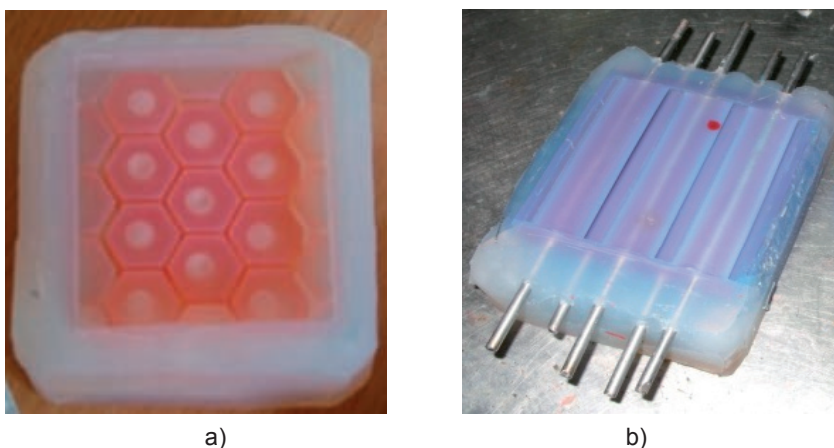
## Wykonanie matryc silikonowych i modeli woskowych

Modele wykonane techniką *rapid prototyping* zostały wykorzystane do przygotowania matrycy silikonowej. Kolejne fazy wykonania matrycy przedstawiono na rysunku 4, w chwili gdy silikon nie był jeszcze całkowicie spolimeryzowany. Otrzymane matryce silikonowe pokazano na rysunku 5.



Rys. 4. Fazy wykonania matryc silikonowych

Fig. 4. Successive stages of making silicone dies



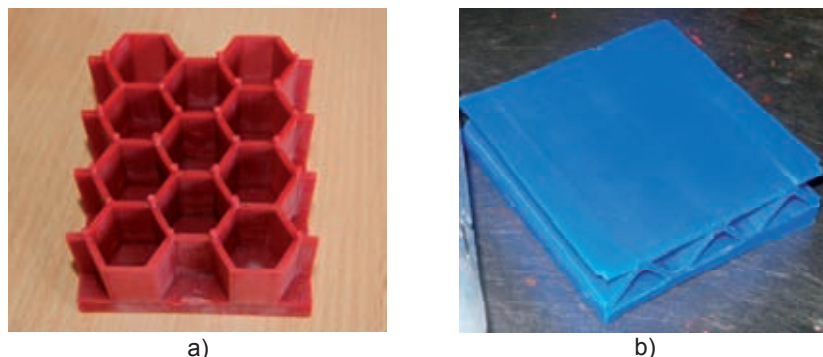
a)

b)

Rys. 5. Matryce silikonowe konstrukcji komórkowej: a - heksagonalnej, b - trapezowej

Fig. 5. Silicone dies of structure: a - hexagonal, b - trapezoidal

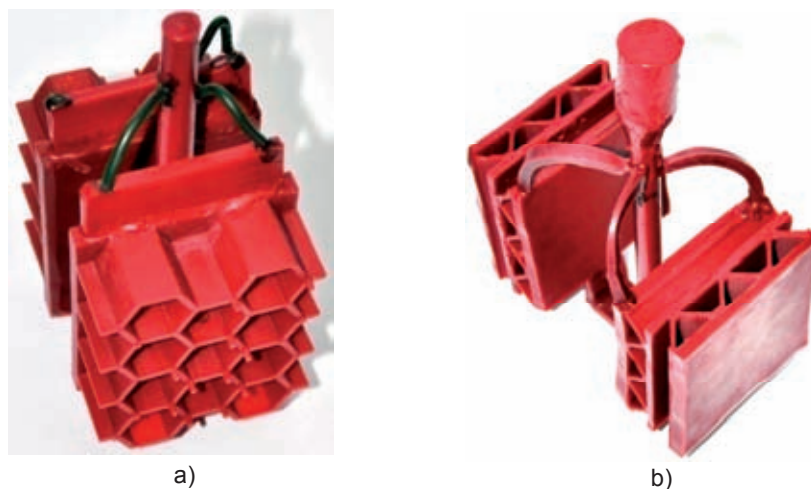
Matryce silikonowe zostały wykorzystane do wykonania modeli woskowych (rys. 6). W celu otrzymania modeli o bardzo dobrej powierzchni i odwzorowaniu kształtu użyta została komora próżniowa. Dzięki zastosowaniu próżni ciekły wosk nie zamykał powietrza wewnątrz wnęki matrycy.



Rys. 6. Modele woskowe konstrukcji przestrzennych: a - heksagonalnej, b - trapezowej

Fig. 6. Wax patterns of spatial structure: a - hexagonal, b - trapezoidal

Ze względu na skomplikowany kształt konstrukcji o rdzeniu trapezowym, model został przygotowany w dwóch częściach, które zostały sklejone ze sobą. Modele woskowe zostały połączone z układem wlewowym, tworząc układ tzw. „drzewka” (rys. 7).



Rys. 7. Zestaw modeli z układem wlewowym konstrukcji komórkowych:  
a - heksagonalnej, b - trapezowej

Fig. 7. A set of patterns with gating system to represent structures:  
a - hexagonal, b - trapezoidal



Przygotowane zestawy zostały wykorzystane jako modele formy gipsowej. Zastosowano próżnię w celu uzyskania dobrej jakości formy. Forma dla modelu heksagonalnego została wykonana w tulei o średnicy 150 mm, natomiast model trapezowy zaformowany został w tulei o średnicy 300 mm. Zastosowanie tulei jest konieczne ze względu na kształt i wymiary pieca wykorzystywanego w procesie odlewania. Etapy przygotowania i odpowietrzenia zostały przedstawione na rysunku 8.



a)



b)

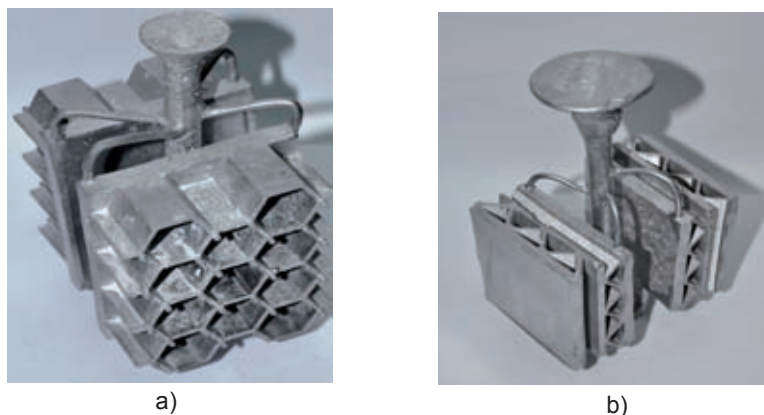


c)

Rys. 8. Kolejne fazy przygotowania formy: a - zalanie ciekłym gipsem, b i c - odpowietrzenie w komorze próżniowej

Fig. 8. Successive stages of making foundry mould: a - pouring with liquid plaster, b and c - air removal in vacuum chamber

Po zakrzepnięciu gipsu forma została umieszczona w piecu w celu odparowania wilgoci, dodatkowego utwardzenia gipsu oraz wstępnego podgrzania formy do odlewania. Po odpowiednim osuszeniu i uzyskaniu właściwej temperatury forma została umieszczona w piecu próżniowym INDUTERM i zalana stopem AK12 w temperaturze 710°C, przy ciśnieniu 1 mbar, w atmosferze argonu; czas zalewania wynosił około 3 s. Uzyskane odlewy przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Odlewy konstrukcji komórkowych o kształcie: a - heksagonalnym, b - trapezowym

Fig. 9. Castings of cellular construction: a - hexagonal, b - trapezoidal

### Badanie odkształceń konstrukcji komórkowej falistej

Przedmiotem badań było zachowanie się odlewu konstrukcji komórkowej trapezowej (*ang. truncated*), o wymiarach 70 x 70 x 30 mm, ze stopu AK12 pod wpływem siły zgniatającej (rys. 10).

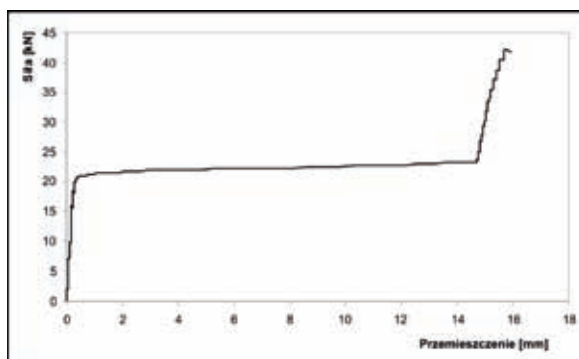


Rys. 10. Odlew konstrukcji komórkowej ze stopu AK12 wykonany metodą wytapianego wosku

Fig. 10. Casting of cellular construction made from AK12 alloy by the lost wax process



Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS 810 (10 T), rejestrując zmiany siły jako funkcję przemieszczenia górnej, płaskiej powierzchni odlewu (rys. 11).



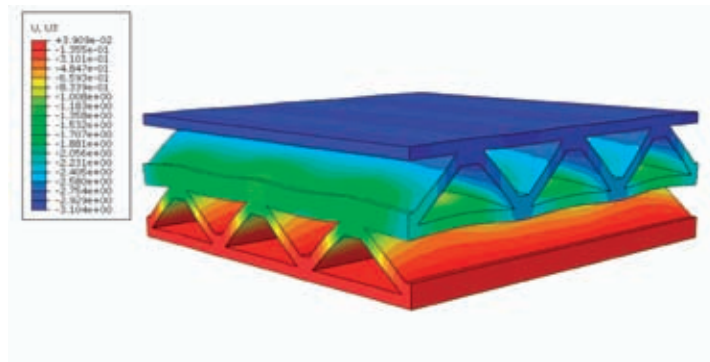
Rys. 11. Krzywa ściskania konstrukcji komórkowej trapezowej

Fig. 11. Compression curve for cellular trapezoidal construction

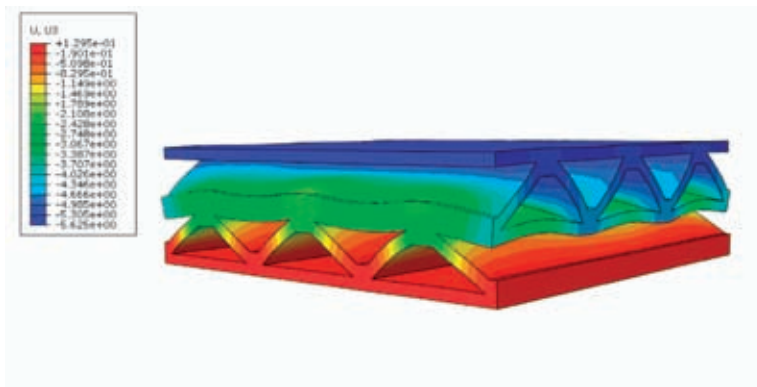
Na podstawie wykresu ściskania stwierdzono występowanie trzech opisywanych w literaturze [5] faz zgniotu, tzn. odkształcenia liniowego (możliwość określenia modułu sprężystości  $E$  dla ściskania struktury), *plateau* odpowiadające niszczeniu struktury i okresu zagęszczania charakteryzującego się gwałtownym wzrostem siły bez znaczących odkształceń. Wykres zgniatania pozwala obliczyć energię odkształcenia, która w tym przypadku, bez uwzględnienia fazy zagęszczania wynosi 323,7 J. Określenie doświadczalne tej wartości służy weryfikacji rozwiązania numerycznego metodą elementów skończonych, która pozwala na wszechstronny ilościowy opis badanego zjawiska, a przede wszystkim daje możliwość porównywania wpływu różnych geometrii i materiałów na zdolność konstrukcji komórkowych do absorpcji energii, co stanowi główny cel badań tego typu konstrukcji przestrzennych.

Na podstawie rozwiązania numerycznego (MES), określono energię zaabsorbowaną przez konstrukcję komórkową, symulując proces zgniatania do połowy grubości odlewu (15 mm), która wynosi 295 J. Występująca różnica 8% pomiędzy obliczeniami a doświadczeniem nie wynika z błędów budowy samego modelu numerycznego, lecz z różnic pomiędzy założonymi w modelu, na podstawie próby rozciągania, właściwościami wytrzymałościowymi tworzywa a rzeczywistymi, które ma odlew. Również wpływ na powyższą różnicę ma wybór sposobu dekohezji tworzywa, który ze względu na różnorodność dostępnych w literaturze [6] rozwiązań może stanowić przedmiot osobnych rozważań wykraczających poza temat niniejszego artykułu. Poniżej zaprezentowano wyniki obliczeń numerycznych (MES) w celu zobrazowania postępującego procesu zgniatania konstrukcji komórkowej (rys. 12).

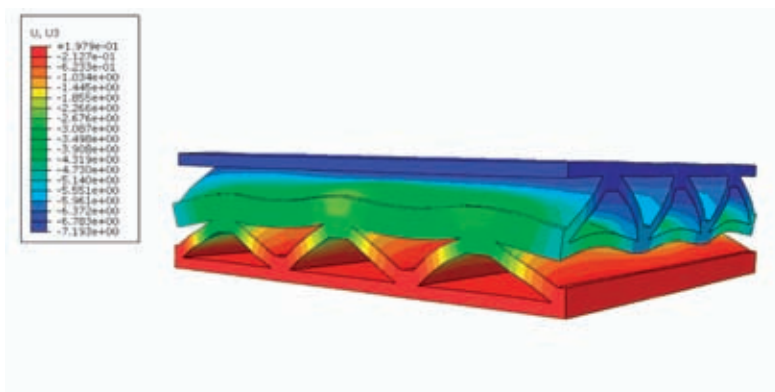
a)



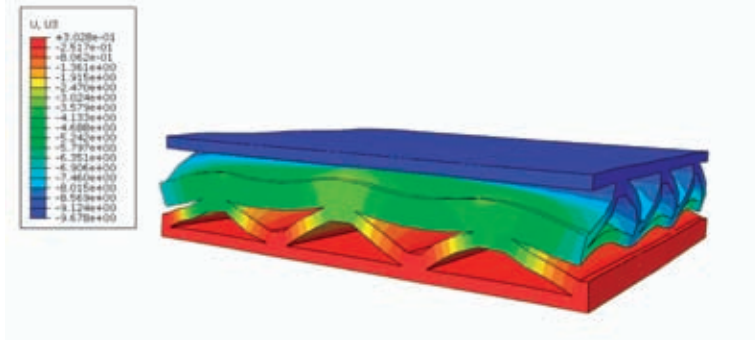
b)



c)



d)

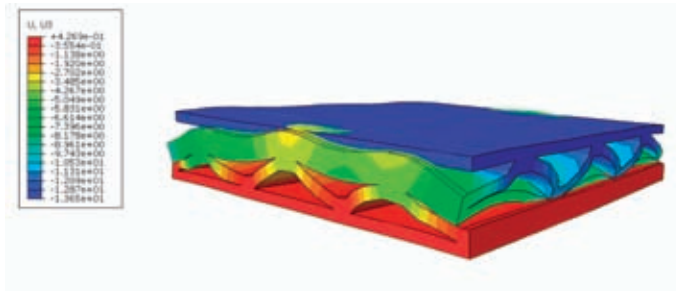


Rys. 12. Kolejne stadia deformacji odlewu; przemieszczenia: a - 3 mm, b - 5 mm, c - 10 mm, d - 12 mm

Fig. 12. Successive stages of casting deformation; displacement: a - 3 mm, b - 5 mm, c - 10 mm, d - 12 mm

Obliczenia symulujące proces zgniatania prowadzono do chwili, gdy wysokość odlewu wyniosła 15 mm, tzn. 50% początkowej wysokości. Jest to praktycznie końcowe odkształcenie odlewu uzyskane podczas doświadczenia. Porównanie rezultatów obliczeń MES jako rysunku zdeformowanego modelu z obrazem odlewu po próbie ściskania wydaje się być dodatkowym potwierdzeniem założeń przyjętych podczas tworzenia modelu numerycznego (rys. 13). W tabeli 2 przedstawiono porównanie właściwości konstrukcji trapezowej i stopu AK12.

a)



b)



Rys. 13. Porównanie zgniecionej do 50% pierwotnej wysokości modelu numerycznego - a oraz odlewu struktury trapezowej - b

Fig. 13. Comparison of numerical models: a - after cold work for 50% original thickness, b - cast trapezoidal structure

Tabela. 2. Porównanie właściwości struktury trapezowej i stopu AK12

Table 2. Trapezoidal structure compared with AK12 alloy structure

	Moduł sprężystości E, GPa	Wytrzymałość na ściskanie $R_c$ , MPa	Masa, g	Maksymalna wartość naprężenia $\sigma_{max}$ , MPa
AK12	70	250	396,9**	
Konstrukcja komórkowa trapezowa	450	4*	168,8	162***

\* naprężenie odpowiadające występowaniu płaskiej części wykresu (*plateau*)  
 \*\* masa odlewu prostopadłościanu o wymiarach 70 x 70 x 30 mm  
 \*\*\* numerycznie obliczona największa wartość naprężenia  $\sigma_{max}$  wg hipotezy H-M-H w ściankach odlewu struktury podczas odkształcenia wynoszącego 50%

Mała wartość wytrzymałości na ściskanie konstrukcji komórkowej (4 MPa) wynika z pominięcia sił, które konstrukcja komórkowa może przenieść w fazie zagęszczania. Natomiast niewątpliwą zaletą tego typu struktury jest zdolność do dużej deformacji plastycznej przy zachowaniu stałej, stosunkowo małej wartości naprężeń. W trakcie obliczeń naprężenia te nie przekraczały granicy wytrzymałości  $R_m$  stopu AK12. Do wartości około 40–45% odkształcenia odlew konstrukcji komórkowej zachowywał spójność we wszystkich obszarach.

## Podsumowanie

Zagadnienie pochłaniania energii przez konstrukcje komórkowe uporządkowane, jak i piany metalowe (struktury losowe, nieuporządkowane), są uznane za priorytetowe w aktualnych planach badawczych branż przemysłu militarnego, lotniczego oraz samochodowego. Celem niniejszego artykułu było z jednej strony przedstawienie możliwości branży odlewniczej z jej nowoczesnymi technologiami i wpisanie się w ten obszar zagadnień, z drugiej - zasygnalizowanie dużych, a może nawet nieograniczonych możliwości prognozowania przebiegu zjawisk statycznych i dynamicznych związanych z dekohezją tworzywa oraz samej konstrukcji pod wpływem sił zewnętrznych na podstawie analizy modeli numerycznych. Przeprowadzone próby i badania potwierdziły zasadność stosowania metod RP do wykonania modelu przestrzennej konstrukcji i uzyskania finalnie odlewu bez wad, o założonym kształcie i dokładności wymiarowej. Stwierdzono również dobrą zgodność pomiędzy symulacją komputerową zgniotu analizowanej konstrukcji komórkowej a przebiegiem doświadczenia. Stanowi to potwierdzenie poprawności budowy modelu numerycznego i jest punktem wyjścia do dalszych analiz obciążeń dynamicznych.

## Podziękowania

Praca została zrealizowana w Instytucie Odlewnictwa przez mgr inż. Marcina Małyszę w ramach praktyki dyplomowej ze źródeł projektu rozwojowego nr 0R00004005 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wzycznego

## Literatura

1. McKown S., Shen Y., Cantwell W.J.: The quasi-static and blast loading response of lattice structures, *International Journal of Impact Engineering*, 2008, Vol. 35, pp. 795–810
2. Hou W., Zhu F.: Ballistic impact experiments of metallic sandwich panels with aluminium foam core, *International Journal of Impact Engineering*, 2010, Vol. 37, pp. 1045-1055
3. Wadley H.N.G., Fleck N.A., Evans A.G.: Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures, *Composites Science and Technology*, 2003, Vol. 63, pp. 2331–2343
4. Gibson L.J., Ashby M.F.: *Cellular Solids – Structure and Properties*, Pergamon Press, Oxford – Toronto, 1988
5. Hucko B., Faria L.: Material Model of Metallic Cellular Solids, *Computer & Structures*, 1997, Vol. 62, No. 6, pp. 1049–1057
6. Valdevit L., Wei Z., Mercer C., Zok F.W., Evans A.G.: Structural performance of near-optimal sandwich panels with corrugated cores, *International Journal of Solids and Structures*, 2006, Vol. 43, pp. 4888–4905