

Krzysztof GLET<sup>1</sup>, Jacek PEZDA<sup>2</sup>

## PROCES ODLEWANIA KOKILOWEGO ELEMENTU OSPRZĘTU SIECIOWEGO

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono opracowanie procesu odlewania kokilowego w oparciu o przeprowadzoną symulację procesu zalewania formy w programie InspireCast. Zastosowanie symulacji umożliwiło weryfikację dobranej formy układu zasilania odlewów w aspekcie potencjalnego wystąpienia wad odlewniczych.

**Słowa kluczowe:** odlewanie kokilowe, symulacja komputerowa, układ zasilania

## DIE-CASTING PROCESS OF AN ELEMENT OF ENERGY OVERHEAD LINES

**Summary:** The study presents development of a die-casting process based on performed with use of InspireCast program simulation of the process of pouring into permanent mould. Implementation of the simulation has enabled verification of a selected pouring system of the die-castings in terms of potential foundry defects.

**Keywords:** die-casting, computer simulation, gating system

### 1. Wstęp

Odlewnictwo jest jedną z technologii wytwarzania przedmiotów (odlewów), posiadających pożądaną formę, wymiar i strukturę, polegającą na zalaniu odpowiednio przygotowanej formy ciekłym materiałem. Jako materiały odlewnicze stosuje się głównie metale i ich stopy, ale także materiały takie jak gips, bazalt, szkło, żywice polimerowe czy wosk. Materiały odlewnicze stosowane w przemyśle muszą mieć odpowiednie właściwości eksploatacyjne, takie jak wytrzymałość czy odporność na korozję. Równie ważne są właściwości technologiczne, czyli zdolność do wypełniania wnęki formy oraz płynięcia metalu. Z tego powodu tworzywa odlewnicze to zazwyczaj stopy eutektyczne oraz okołoeutektyczne, które najlepiej odtwarzają szczegóły kształtu odlewu [1].

---

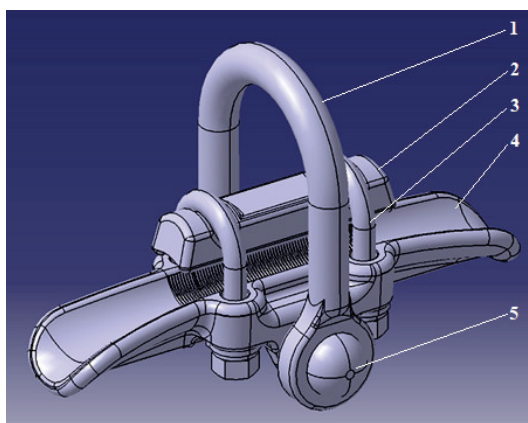
<sup>1</sup> inż., Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, [krzysztofglet@gmail.com](mailto:krzysztofglet@gmail.com)

<sup>2</sup> dr hab. inż., prof. ATH, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, [jpezda@ath.bielsko.pl](mailto:jpezda@ath.bielsko.pl)

Procesy odlewnicze są wykorzystywane w produkcji wyrobów dla większości gałęzi gospodarki. Jedną z wielu metod odlewania jest odlewanie kokilowe, które pozwala na względnie proste i wielokrotne wytwarzanie części przy użyciu jednej formy. Obecnie wytwarzanie odlewów przy najmniejszej liczbie braków jest kluczowe do osiągnięcia wysokich zysków dla odlewni. Możliwość „przewidywania” wystąpienia wad i przeprojektowanie metody odlewania lub samej kokili zanim dojdzie do realizacji procesu odlewania daje ogromne możliwości oszczędności dla odlewni. Symulacje komputerowe w każdej dziedzinie wytwarzania, stały się nieodłączną częścią projektowania procesów produkcyjnych. W oparciu o otrzymany model komputerowy odlewanej części i formy odlewniczej można wykonać rysunki konstrukcyjne gotowej części, surowego odlewu, układu zasilania i w efekcie formy.

## 2. Charakterystyka odlewane go elementu

Na rysunku 1 przedstawiono model CAD uchwytu przelotowego wahliwego, wykorzystywanego jako osprzęt sieciowy do podtrzymywania przewodów napowietrznych linii średniego napięcia o średnicy 16–22 mm.



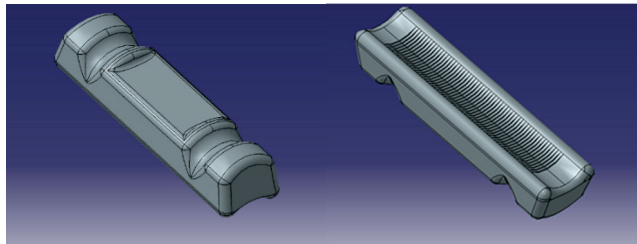
Rysunek 1. Uchwyt przelotowy wahliwy: 1 - kabłąk; 2 - nakładka dociskowa; 3 - śruba kabłąkowa; 4 - łódka; 5 - sworzeń

Kabłąk oraz części złączne uchwytu zostały wykonane ze stali cynkowanej ogniowo, natomiast do wykonania korpusu zacisku wykorzystano stop aluminium AlSi7Mg. Stop odlewniczy Al-Si7Mg według PN-76/H-88027 (stara norma) jest oznaczony jako AK7; takie oznaczenie jest często stosowane w literaturze. Znak stopu wg PN-EN 1706+A1:2022-01 to AC-AlSi7Mg a numer materiału jest oznaczany jako EN AC-42000 [2]. Stop AlSi7Mg jest stopem podeutektycznym. Mikrostruktura stopu składa się z dendrytów roztworu  $\alpha$ , pomiędzy którymi występują drobnoziarniste wydzielania eutektyki  $\alpha(\text{Al})+\beta(\text{Si})$ . Stop AlSi7Mg krzepnie dendrytycznie. Odległość ramion dendrytu ma wpływ na wytrzymałość stopu [3]. Właściwości mechaniczne stopu zależą w dużym stopniu od rozłożenia i wielkości pierwotnej fazy  $\alpha$  (Al). Obniżanie zawartości Si w stopie AlSi7Mg skutkuje zwiększeniem zakresu krzepnięcia oraz powoduje wzrost skłonności do tworzenia

porowatości. Stop jest wysoce wytrzymały i ciągliwy, ale ma przeciętną lejność. Skurcz stopu wynosi 1,3% [3,4].

Kryteria doboru klasy dokładności wykonania odlewu zależą od rodzaju odlewanej stopu oraz metody jego odlewania. Dla odlewania kokilowego metali nieżelaznych przyjęto IV klasę dokładności wykonania odlewu i na tej podstawie dobrano tolerancje wymiarowe dla odlewu surowego [5].

Opracowanie procesu odlewania dotyczy górnej części korpusu zacisku – nakładki dociskowej. Model nakładki dociskowej przygotowany w programie Catia V5 przedstawiono na rysunku 2.



Rysunek 2. Model nakładki dociskowej

Odlew nie jest częścią współpracującą z żadnym mechanizmem oraz nie posiada otworów i wymiarów które powinny mieć ściśle określone wartości. Dlatego naddatek technologiczny został pominięty.

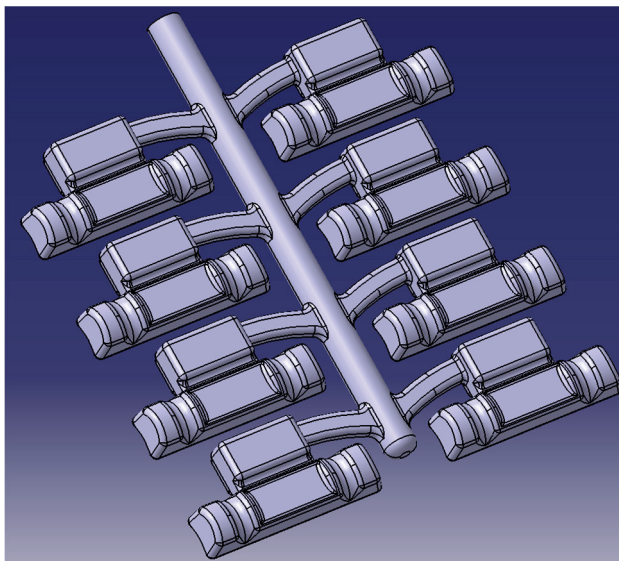
### 3. Sposób odlewania i układ zasilania odlewu

W zależności od miejsca doprowadzenia ciekłego metalu do odlewu i sposobu jego usytuowania w formie można wyróżnić odlewanie z góry, z boku i od dołu.

Odlewanie z góry zapewnia skuteczne zasilanie odlewu i łatwe uzyskanie kierunkowego krzepnięcia, zwłaszcza przy odlewaniu stopów o szerokim zakresie temperatur krzepnięcia. Uzyskuje się zwartą budowę kokili, małą pracochłonność przy oczyszczaniu odlewu i wysoką wydajność odlewania. Skłonność aluminium i jego stopów do utleniania się (tworzenia wtrąceń tlenkowych) ogranicza zakres stosowania odlewania z góry ze względu na ułatwione przedostawanie się wtrąceń do odlewu. Taki sposób odlewania w najniższym stopniu spełnia zasadę minimalizacji drogi ciekłego metalu we wnęce formy. Należy dodać, że droga ta skraca się wraz z postępującym wypełnieniem formy [6].

Prawidłowo wykonany układ wlewowy do odlewania od dołu zapewnia spokojne wypełnienie wnętrza kokili. Taki sposób wypełnienia formy powoduje zaburzenia przy przepływie ciekłego metalu przez układ wlewowy. Aby uniknąć takich trudności należy natychmiastowo zapłacić wlew główny, zanim wnęka kokili zacznie się wypełniać ciekłym metalem. Zalecane jest stosowanie wielu wlewów doprowadzających w celu uniknięcia lokalnych przegrzań. Wadą takiego sposobu wypełnienia formy jest to, że nadlewy są wypełniane metalem o najniższej temperaturze. Dlatego wymagane jest ogrzewanie górnej części kokili i stosowanie pokryć izolujących w celu uzyskania kierunkowego krzepnięcia od odlewu w kierunku nadlewu [6].

Odlewanie z boku pozwala na spokojny przepływ metalu oraz wypełnienie odlewu, umożliwiając kierunkowe krzepnięcie. Przechylenie kokili podczas odlewania zapewnia jeszcze bardziej korzystne warunki wypełniania i krzepnięcia. Pozwala to także na wyparcie powietrza i żuźla do nadlewu. Taki układ jest stosowany w różnych modyfikacjach, gdzie wlew może być prawie na całej długości połączony z odlewem cienkim wlewem doprowadzającym lub może zostać podzielony na części [6]. Na rysunku 3 przedstawiono model surowego odlewu.



Rysunek 3. Model surowego odlewu

Przewężenie doprowadzające ciekły metal do odlewów nakładek umieszczono, tak aby tworzyło połączenie z boczną ścianką odlewu (odlewanie z boku), ułatwiając odcięcie układu zasilania od odlewu po zakończonym procesie odlewania. Doprowadzenie ciekłego metalu do odlewu przez dłuższy bok zapewni szybsze wypełnienie wnęki formy przez większą powierzchnię połączenia.

Ciekły metal doprowadzono do wnęki formy za pomocą wlewu głównego prostego o przekroju kołowym i powierzchni przekroju  $2,54 \text{ cm}^2$ . Po przechyleniu formy wlew główny nie powoduje zawirowań powietrza i wprowadzania go do wnęki formy, tak jak dzieje się to w przypadku wlewów prostych pionowych [6]. W wyniku kontaktu ciekłego metalu z chłodniejszą formą na czyle strugi powstają zanieczyszczenia, które nie powinny trafić do wnęki formy. Przedłużenie wlewu głównego poza ostatnie wlewy rozprowadzające pozwala na uniknięcie bezpośredniego wypełnienia odlewu przez pierwszą strugę ciekłego metalu. Od wlewu głównego rozchodzą się wlewy rozprowadzające o powierzchni przekroju poprzecznego około  $1 \text{ cm}^2$ , nieco zakrzywione aby uniknąć przedostawania się zanieczyszczeń do nadlewu.

Przyjęto wartość  $80^\circ$  pochylenia, jaki ma osiągnąć forma w chwili jej wypełnienia. Aby pozbawić odlew wad pochodzenia skurczowego w postaci jam skurczowych i rzadzin stosuje się nadlewy. W konsekwencji nadlew zmniejsza uzysk metalu, ale pozwala na wykonanie odlewu bez wad. Nadlew spełnia rolę sztucznego zapasu

ciekłego metalu, mając za zadanie kompensację zmian objętości stopu podczas skurczu objętościowego w stanie ciekłym oraz podczas krzepnięcia odlewu [5].  
 Odlew został zaprojektowany tak, aby w trakcie jednego cyklu odlewania uzyskać osiem detali. Większa ilość detali w odlewie powoduje wzrost wydajności odlewania, kosztem większego zużycia oprzyrządowania odlewniczego i zwiększania wymiarów formy. Maksymalny rozmiar formy jest ograniczony przez rozmiary stołu roboczego zastosowanej kokilarki. Zasadność stosowania zwiększonej liczby detali w odlewie podyktowana jest wielkością serii wykonywanych odlewów.  
 Do odlewania stopów aluminium najczęściej stosowane są w kokile żeliwne. Bardzo korzystna jest także struktura perlityczna, cechująca się dobrą odpornością na ścieranie, zawierająca grafit w formie drobnych płatków, której przewodzenie ciepła i temperatury jest około dwukrotnie wyższe niż żeliwa perlitycznego sferoidalnego. Na kadłub kokili wybrano żeliwo szare perlityczne, którego skład przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Skład chemiczny materiału użytego na kadłub kokili [6]

Pierwiastek	C	Si	Mn	Mo	Cr	S	P
Zawartość, %	3,2– 3,5	1,5– 1,7	0,8–1,0	0,5–1,0	0,2–0,6	do 0,12	do 0,1

Obliczenie czasu wypełnienia wnęki kokili (czasu zalewania) ciekłym metalem wyznaczono z zależności o ogólnej postaci [5]:

$$\tau_{zal} = k \times g^m \times Q^n, s \quad (1)$$

gdzie:  $\tau_{zal}$  – czas zalewania, s ;  
 k – współczynnik zależny od rodzaju stopu i grubości ścianki,  
 g – średnia grubość ścianki odlewu w mm,  
 Q – masa odlewu wraz z układem wlewowym w kg,  
 m i n – współczynniki zależne od rodzaju stopu.

Masę odlewu wraz z układem wlewowym obliczono za pomocą modelu surowego odlewu w programie Catia V5, mierząc jego objętość i wprowadzając gęstość materiału dla stopu AlSi7Mg odpowiednio 2,68 g/cm<sup>3</sup>. Stąd otrzymano masę odlewu Q równą 1,53 kg. Średnia grubość ścianki odlewu to 20 mm. Wartość współczynników „k”, „m”, „n” przyjęto dla odlewania stopów aluminium. Wartość współczynnika „k” rośnie wraz ze wzrostem grubości ścianki odlewu i analogicznie maleje z wraz z jej spadkiem; jest także różna dla różnego rodzaju stopów. Dla zakresu grubości ścianki odlewu 15–20 mm przyjmuje się wartość współczynnika k równą 2,4 dla stopów aluminium. W tabeli 2 przedstawiono wartości współczynników „k”, „m” i „n” dla wzoru ogólnego do obliczenia czasu zalewania kokili.

Tabela 2. Wartość współczynników k, m i n dla wzoru ogólnego [5]

Tworzywo odlewu	Wartość współczynnika		
	k	m	n
Stop aluminium	1,7–3,0	0,334	0,334

Po wstawieniu wartości liczbowych do równania (1) otrzymano:

$$\tau_{zal} = 2,4 \times 20^{0,334} \times 1,539^{0,334} \quad (2)$$

Stąd otrzymano czas zalewania:

$$\tau_{zal} \approx 7,5 s \quad (3)$$

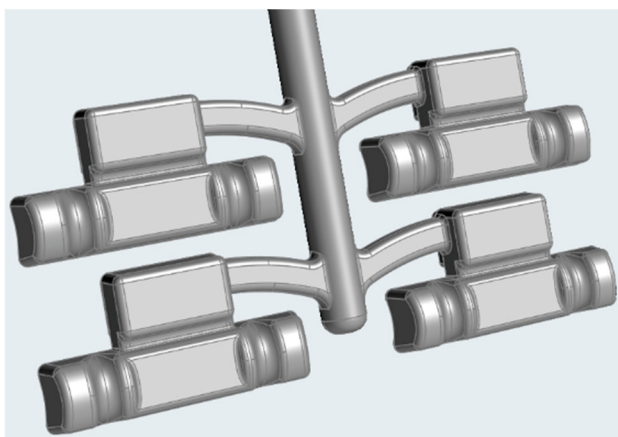
Przyjęto wartość średnią z zakresu zalecanych temperatur odlewania stopu AlSi7Mg oraz ścian kokili i wybicia odlewu. Zalecane oraz przyjęte temperatury przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Zalecana i przyjęta temperatura odlewania, ścian kokili i wybijania odlewu [6]

Rodzaj temperatury	Temperatura, °C		
	odlewanie	ścian kokili	wybicia
Zakres temperatur	680–730	200–250	200
Przyjęta temperatura	705	225	200

#### 4. Symulacja procesu odlewania

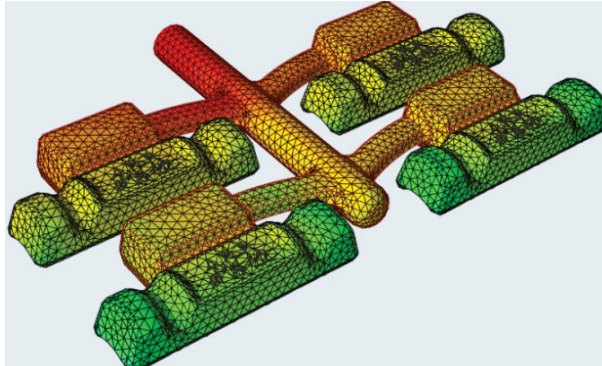
Model odlewu przedstawiony na rysunku 3 został uproszczony do odlewu czterech detali (rys. 4). Zmniejszenie modelu odlewu przekłada się na dokładność otrzymanych wyników jak i czas obliczeń. Oprócz uproszczonego modelu głównego, przygotowane zostały także trzy inne koncepcje modeli układów wlewowych, przeznaczone do odlewania nakładki dociskowej (nieuwzględnione w artykule).



Rysunek 4. Uproszczony model odlewu

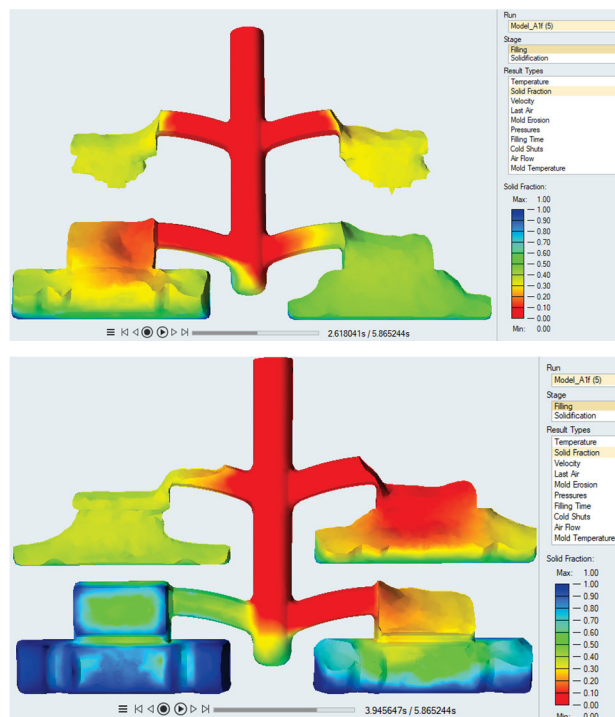
Po zaimportowaniu modelu do programu Altair Inspire Cast, zdefiniowano odpowiednio część modelu jako układ zasilania i odlew zasadniczy nakładki dociskowej. Przypisano rodzaj stopu odlewniczego oraz jego temperaturę w trakcie zalewania. Przygotowany model odlewu został poddany analizie zalewania i krzepnięcia stopu w formie kokilowej. Rozkład siatki „mesh” dla modelu przedstawiono na rysunku 5. Siatka „mesh” jest równomierna w każdym obszarze modelu.



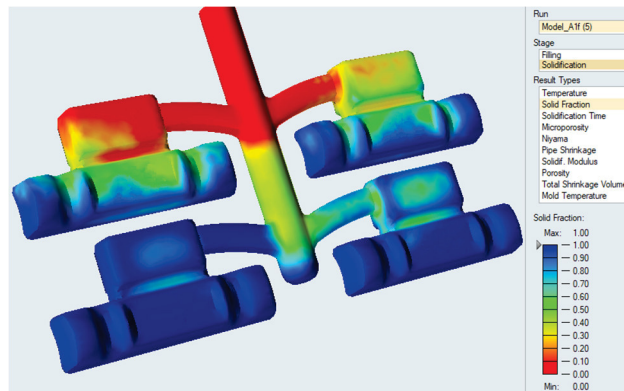


Rysunek 5. Siatka „mesh” dla modelu odlewu

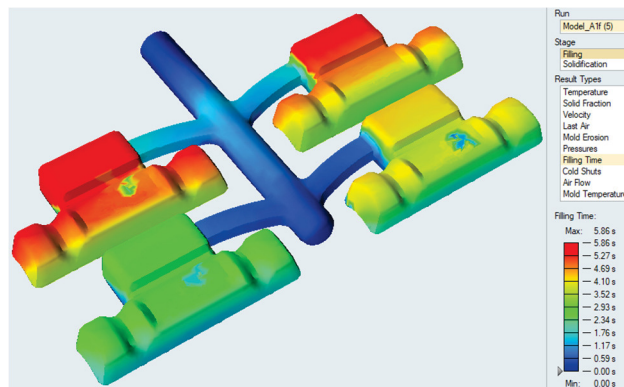
Wybrane wyniki analizy przedstawiono na rysunkach 6-16. Na rysunkach 6-8, przedstawiono proces wypełniania wnętrza kokili, wraz z procentową zawartością fazy stałej w metalu. Analiza wypełnienia kokili wskazuje, że metal podczas wypełniania formy traci sporą część temperatury i zaczyna się powoli zestalać, zgodnie z rysunkiem 7.



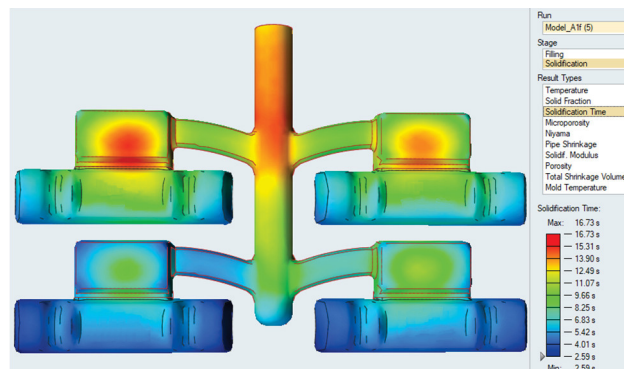
Rysunek 6. Wypełnianie wnętrza formy z udziałem fazy stałej w trakcie zalewania formy



Rysunek 7. Wnęka formy po zalaniu formy



Rysunek 8. Czas wypełnienia formy

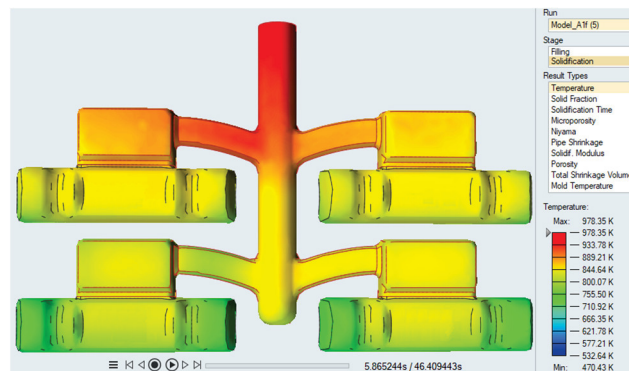


Rysunek 9. Czas krzepnięcia odlewu

Na podstawie rysunku 8, który przedstawia czas wypełnienia formy jak i rysunku 6, można zaobserwować, że wypełnianie kokili nie zachodzi jednakowo dla dolnej,

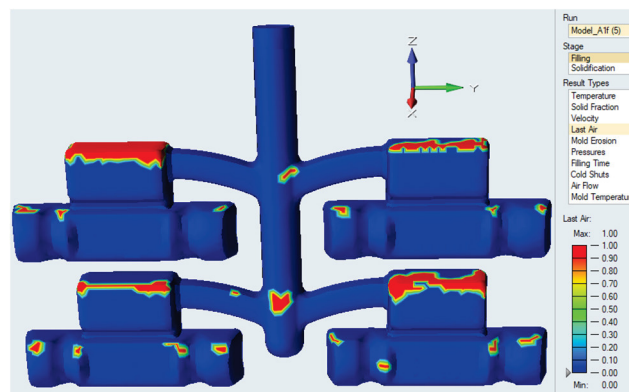


a następnie górnej pary odlewów. Dopiero po pełnym wypełnieniu odlewu, sąsiadująca wnęka zostaje ponownie w pełni zasilana i wypełniona. Analizując rysunki 7-9 można stwierdzić, że po wypełnieniu formy, krzepnięcie zachodzi prawidłowo, od zewnętrznych powierzchni odlewu, przesuwać się do wnętrza odlewu, a następnie do nadlewu, który zasila krzepnące wcześniej wnętrze odlewu. Czas krzepnięcia odlewu wynosi niecałe 17 sekund. Na rysunku 10 przedstawiono rozkład temperatury odlewu w momencie wypełnienia formy.



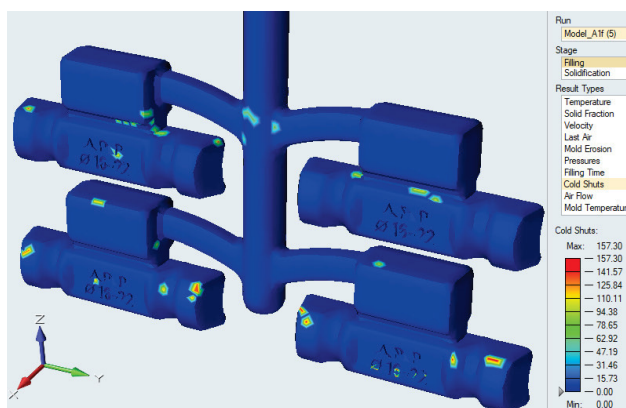
Rysunek 10. Temperatura odlewu w chwili wypełnienia formy

Rysunek 11 przedstawia miejsca (oznaczone kolorem czerwonym) w których pozostaje uwięzione powietrze. Obszary oznaczone kolorem czerwonym są najbardziej narażone na wystąpienie wad w postaci nakłuc lub pęcherzy; wyraźnych jam kulistych lub podłużnych, powodujących powstanie „pustej przestrzeni”.



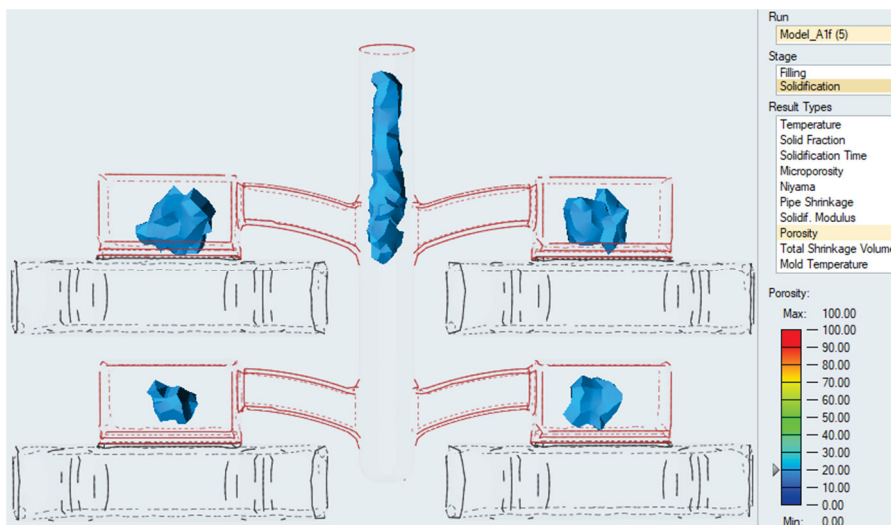
Rysunek 11. Obszary pozostającego powietrza

Na podstawie analizy rysunku 12, można stwierdzić, że w odlewie wystąpią niewielkie, głównie punktowe i tylko w zewnętrznej jego części, wady w postaci niespawów. Kolorowa skala wskazuje temperaturę, jaka różni spotykające się w tym miejscu dwa fronty ciekłego metalu wypełniającego odlew.



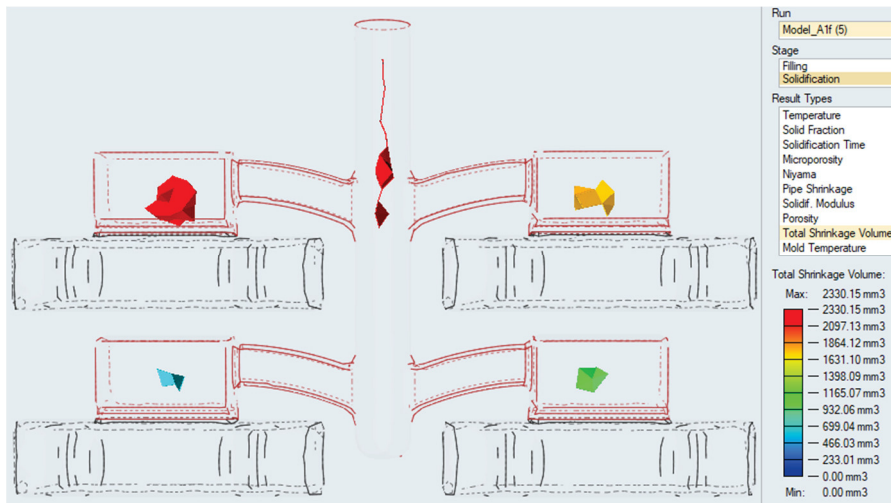
Rysunek 12. Obszary występowania niespawów

Przedstawiona na rysunku 13 symulacja przedstawia obszary, w których stosunek pustych przestrzeni do pełnych obszarów jest większy lub równy określonej wartości wyrażonej w procentach (w tym przypadku jest to 20%). Wszystkie obszary, w których powstaje pusta przestrzeń w wyniku krzepnięcia metalu znajdują się w układzie zasilania.



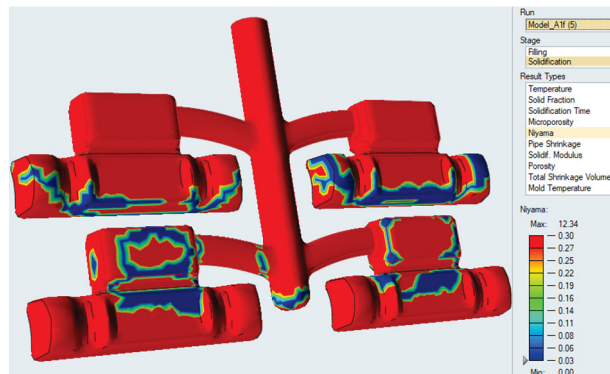
Rysunek 13. Porowatość w odlewie

Na rysunku 14 przedstawiono objętość pustej przestrzeni, czyli powstałej jamy skurczowej. „Total Shrinkage Volume” wyraża skurcz całkowity, czyli sumę skurczu cieczy, skurczu krzepnięcia i skurczu stałego.



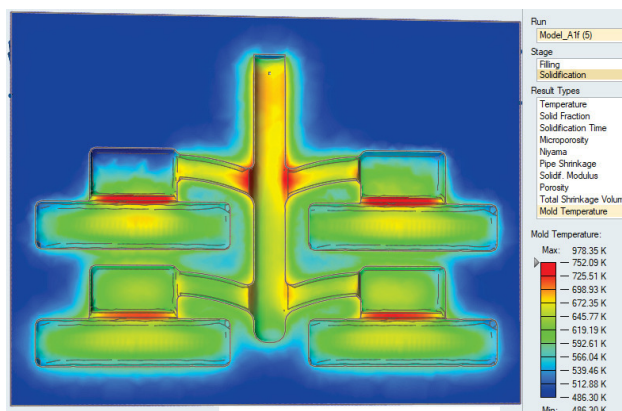
Rysunek 14. Skurcz całkowity odlewu

Do oceny występowania obszarów narażonych na mikroporowatość stosowane jest kryterium Niyama. Jest to współczynnik wykorzystywany przez odlewnie do wykrywania defektów skurczu krzepnięcia. Wartość krytyczna Niyamy dla stopów aluminium poniżej której występuje mikroporowatość wynosi 0,25–0,3. Wraz ze spadkiem wartości Niyama, wzrasta prawdopodobieństwo wystąpienia mikroporowatości. Wartości bliskie 0 wskazują obszary o większej porowatości [7]. Rysunek 15 ukazuje obszary (niebieski kolor), które są wysoce narażone na porowatość skurczową.



Rysunek 15. Współczynnik Niyama dla odlewu w zakresie krytycznym dla aluminium

Rysunek 16 przedstawia rozkład temperatury formy po zakończeniu odlewania. Obszary w których temperatura wzrasta najwyżej znajdują się w przelewie pomiędzy nadlewem i odlewem detalu.



Rysunek 16. Temperatura formy w płaszczyźnie podziału odlewu w chwili wypełnienia kokili

## 5. Podsumowanie i wnioski

Symulacja przeprowadzona przy zadanych parametrach procesu odlewania wykazała, że w analizowanym odlewie zachodzi krzepnięcie kierunkowe kończące się w nadlewie, który zasila krzepnące wcześniej wewnątrz odlewu.

Wszystkie obszary, w których powstaje pusta przestrzeń (porowatość skurczowa) w wyniku krzepnięcia metalu znajdują się w nadlewach układu zasilania.

Na podstawie wyników symulacji dotyczących pozostałego w formie powietrza można stwierdzić, że odlew posiada wady w postaci niewielkich pęcherzy na zewnętrznych powierzchniach odlewu nie wpływających na jego funkcjonalność.

Analizowane rozwiązanie można zarekomendować do wdrożenia procesu odlewania nakładki dociskowej.

## LITERATURA

1. ZOLOTOREVSKY V.S. *et al.*: Casting Aluminum Alloys. Elsevier, Oxford 2007.
2. PN-EN 1706+A1:2022-01: Aluminium i stopy aluminium - Odlewy - Skład chemiczny i własności mechaniczne.
3. GÓRNY Z.: Odlewnicze stopy metali nieżelaznych. WNT, Warszawa 1992.
4. ROMANKIEWICZ F.: Modyfikacja stopu AlSi7Mg, Krzepnięcie Metali i Stopów, Katowice **27**(1996), 200-209.
5. MODRZYŃSKI A.: Technologia odlewnictwa. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2015.
6. GÓRNY Z., LECH Z.: Odlewanie kokilowe stopów metali nieżelaznych. WNT, Warszawa 1975.
7. LIOTTI E.: Study of the validity of the Niyama criteria function applied to the alloy AlSi7Mg. La Metallurgia Italiana, **9**(2006), 33-37.