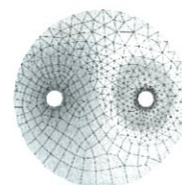




Wydawnictwo
Naukowe
AKAPIT



ANALIZA FORMOWANIA STOPÓW ALUMINIUM I MAGNEZU W STANIE STAŁO-CIEKŁYM PRZY UŻYCIU ZAAWANSOWANEGO MODELOWANIA KOMPUTEROWEGO

KRZYSZTOF SOLEK, ANDRZEJ BIAŁOBRZESKI, TOMASZ STUCZYŃSKI, ZBIGNIEW MITURA

ANALYSIS OF FORMING OF ALUMINIUM AND MAGNESIUM ALLOYS IN SEMI-SOLID STATE BY ADVANCED COMPUTER MODELLING

Abstract

Metal forming in semi-solid state currently attracts a lot of research effort since only few manufacture steps lead to satisfactory mechanical properties even for complicated shapes. This paper presents recent authors' results for thixocasting. First, a whole technological process is described. Next, numerical modelling of pressure casting die filling (thixocasting) is described. New constitutive equation parameters are obtained by means of inverse analysis and applied within package FORGE®. The main results are given for Al-Si alloy; however, some preliminary discussion for Mg-Al investigation is also provided. The presented results would seem to prove that reliable numerical simulation of advanced technological processes is possible.

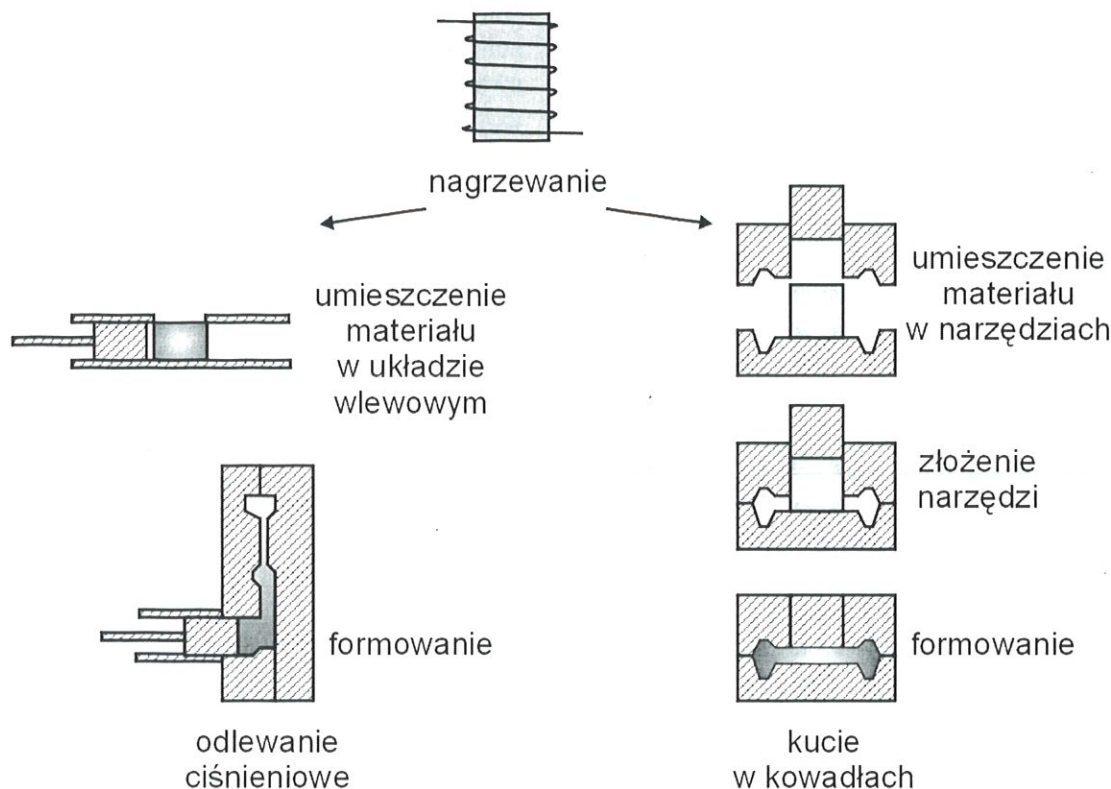
1. WSTĘP

Obecnie wiele prac badawczych prowadzonych na świecie dotyczy opracowywania nowych technologii przetwarzania materiałów w stanie charakteryzującym się współlistnieniem fazy stałej i ciekłej (opisy różnych technologii tego typu można znaleźć w materiałach konferencyjnych poświęconych nowym trendom badawczym, np. Sahm i in. 2000, Mori 2001, Pietrzyk i in. 2002, itd.). Takie technologie można stosunkowo łatwo realizować praktycznie w stosunku do stopów, dla których współlistnienie fazy ciekłej i fazy stałej zachodzi w przedziale kilkunastu stopni Celsjusza. Bardzo

obiecujące wyniki uzyskuje się, jeśli ponadto w przetwarzanym materiale niewielkie zestalone fragmenty materiału mają kształt sferoidalny i są zanurzone w ciekłej osnowie o małej lepkości. Jeśli warunek ten jest spełniony to wówczas mówimy o materiale, że jest w stanie tiksotropowym, natomiast jego przetwarzanie nazywane jest formowaniem tiksotropowym. Na rysunku 1 przedstawiono najbardziej popularne sposoby realizowania formowania tego typu.

Schemat przedstawiony na rysunku 1 opracowano przy założeniu, że materiał wsadowy w postaci wałków posiadających mikrostrukturę globularną został przygotowany już wcześniej, w niezależnym procesie.

K. Solek, Z. Mitura, Wydział Metalurgii i Inżynierii Materiałowej, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska; A. Białobrzewski, Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Polska; T. Stuczyński, Instytut Metali Nieżelaznych, Oddział Metali Lekkich, ul. Piłsudskiego 19, 32-050 Skawina, Polska



Rysunek 1. Przykładowe sposoby formowania materiałów w stanie stało-ciekłym.

Faktycznie istnieje wiele sposobów aby to osiągnąć. Najbardziej typową metodą jest magneto hydrodynamiczne mieszanie materiału (ang. magnetohydrodynamic stirring) poddanego procesowi półciągnętego odlewania. Inną możliwością jest np. zastosowanie wyciskania, z następującym po nim wygrzewaniem materiału w temperaturze, w której oprócz fazy stałej istnieje pewien ułamek fazy ciekłej. W ten sposób można wymusić rekrytalizację oraz częściowe przetopienie (ang. recrystallisation and partial remelting). Niezależnie od zastosowanej metody zakłada się, że ostatecznie otrzymywany jest materiał wsadowy w postaci jednorodnych wałków o temperaturze pokojowej, które można składować, przenosić itp. Posiadając tak przygotowany materiał można przystąpić do formowania wyrobu o pożądanym kształtach. Zgodnie z rysunkiem 1 formowanie to może być zrealizowane w jednej z dwóch przedstawionych postaci, tj. jako odlewanie tiksotropowe (któremu poświęcona jest niniejsza praca) lub jako kucie tiksotropowe. Faktycznie istnieje duże podobieństwo pomiędzy tymi procesami. Stosowanie różnych nazw wynika z faktu, że w pierwszym przypadku do formowania materiału używana jest ciśnieniowa maszyna odlewnicza, proces przebiega przy dużym udziale fazy ciekłej (ok. 50%) oraz ponadto przetwarzaniu podlega stop o charakterze odlewniczym. Natomiast w drugim przypadku stosowane są typowe urządzenia do przeróbki plastycznej, udział fazy ciekłej w materiale jest niewielki (ok. 20%) oraz przetwarzany

jest stop przeznaczony do przeróbki plastycznej. Podane tutaj informacje należy traktować jednak wyłącznie orientacyjnie, gdyż wspomniane technologie wciąż są w fazie rozwojowej, tak więc sposoby ich praktycznej realizacji mogą jeszcze ulegać dużym zmianom. Oceniając stan obecny można zaś powiedzieć, że produkty uzyskane przy pomocy odlewania tiksotropowego mają mniej wad niż analogiczne produkty uzyskane przy pomocy klasycznego odlewania ciśnieniowego, gdyż w przypadku zastosowania formowania tiksotropowego przepływ materiału następuje w sposób regularny, tj. pojawianie się turbulencji jest bardzo ograniczone w stosunku do warunków odlewania tradycyjnego. Turbulencje zaś mogą być przyczyną powstawania wielu wad, np. mogą powodować zamykanie pęcherzy powietrza w odlewającym materiale. Odlewanie tiksotropowe jest już obecnie realizowane na skale przemysłową, np. stopy aluminium wykorzystuje się do wyrobu części samochodowych, natomiast stopy magnezu stosuje się do wyrobu obudów przenośnych urządzeń elektronicznych typu telefony komórkowe. Jeśli chodzi zaś o wspomniane wcześniej kucie tiksotropowe to technologia ta jest wciąż bardziej na etapie badań podstawowych niż na etapie wdrożeń produkcyjnych. Jednak ewentualne zastosowania tej technologii są bardzo atrakcyjne, co uzasadnia fakt prowadzenia wielu prac badawczych w tej dziedzinie. Chodzi mianowicie o to, że stopy odlewnicze są zwykle znacznie mniej wytrzymałe niż stopy stosowane w przerób-

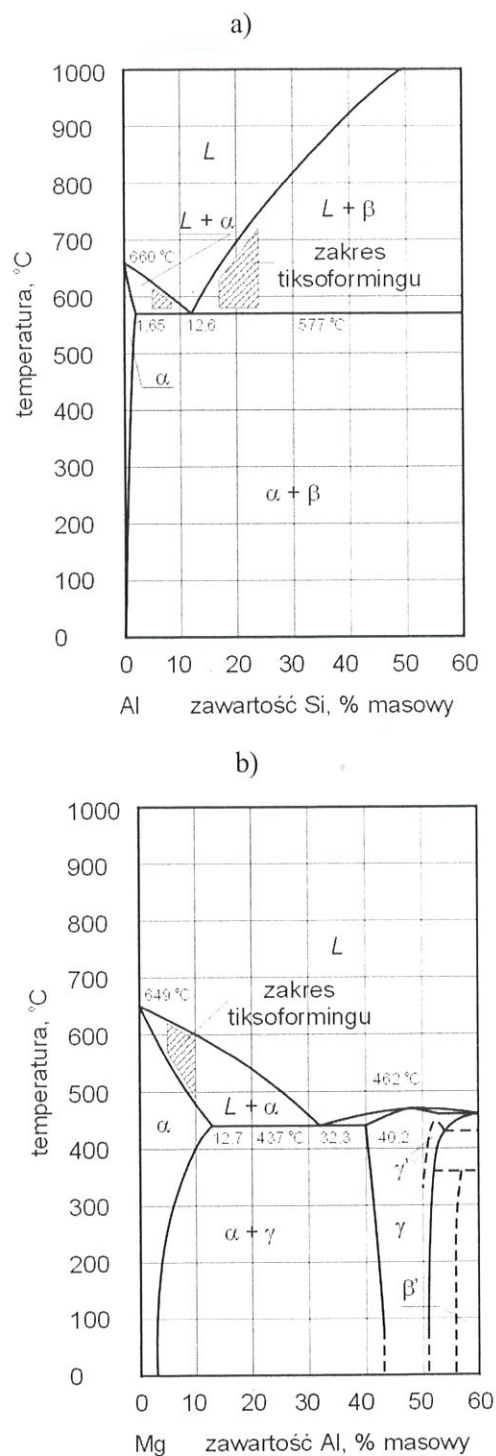


ce plastycznej. Stosując klasyczne kucie, wyciskanie itp. nie można jednak uzyskiwać dowolnie skomplikowanych kształtów wyrobów (np. wymagane mogą być zbyt duże siły, materiał może ulegać zniszczeniu w przypadku realizowania dużych deformacji itp.). Dlatego też w tej chwili prowadzi się intensywne badania nad tiksotropowym formowaniem stopów aluminium serii 2000, 6000 oraz 7000 (Atkinson 2002), które są tradycyjnymi stopami do przeróbki plastycznej, znajdującymi zastosowanie w motoryzacji oraz w lotnictwie. Warto w tym miejscu nadmienić, że prekursorem, na skalę międzynarodowa, badań nad kuciem tiksotropowym był Łapkowski (wraz z osobami z nim współpracującymi) z Akademii Górniczo-Hutniczej (Łapkowski i in. 1992, Łapkowski i Pietrzyk 1994, Łapkowski 1998).

Podany powyżej opis wybranych technologii formowania tiksotropowego został zaprezentowany pod kątem tematyki badań przeprowadzonych przez autorów niniejszego artykułu. Warto więc podkreślić, że nie obejmuje on wszystkich aktualnych trendów badawczych omawianej dziedziny i w związku z powyższym wydaje się istotne wspomnieć tutaj krótko jeszcze o dwóch innych, dość ważnych kierunkach prac badawczych. Tak więc trwają badania nad zintegrowanym odlewaniem materiałów tiksotropowych, w którym przygotowanie wsadu oraz uzyskanie produktu końcowego przeprowadzane jest w ramach jednego urządzenia, tj. bez stosowania dodatkowego schładzania oraz nagrzewania materiału, które jest nieuniknione w odlewaniu tiksotropowym zaprezentowanym na rysunku 1. W uproszczeniu można powiedzieć, że celem badań nad opracowaniem zintegrowanych systemów jest zminimalizowanie kosztów. Natomiast inny ważny kierunek aktualnych badań to tiksotropowe formowanie materiałów wysokotopliwych, takich jak stopy miedzi czy stal (np. Kopp i in. 2002). W tym wypadku duże koszty przetwarzania będą zawsze nieuniknione, z uwagi na kłopoty z zapewnieniem odpowiednich narzędzi odpornych na działanie wysokich temperatur. Jednak to co czyni te badania atrakcyjnymi, to ewentualna możliwość opracowania technologii formowania produktów o dowolnie skomplikowanych kształtach posiadających jednocześnie szczególnie dobre własności mechaniczne.

Niniejszy artykuł poświęcony jest odlewaniu tiksotropowemu stopów lekkich niskotopliwych. Zastosowanie stopów metali lekkich do produkcji części mechanicznych pozwala zredukować całkowitą masę maszyn lub urządzeń. Warto przypomnieć, że gęstość aluminium ($\rho_{Al} = 2,7 \text{ Mg/m}^3$) jest około trzy razy mniejsza od gęstości żelaza ($\rho_{Fe} = 7,87 \text{ Mg/m}^3$). Natomiast gęstość magnezu ($\rho_{Mg} = 1,8 \text{ Mg/m}^3$) jest około cztery razy mniejsza od wspomnianej gęstości żelaza. Ponadto, jeśli przetwarzanie materiałów przebiega w temperaturach znacznie niższych niż temperatura topnienia stali wówczas stosunkowo łatwo można uniknąć kło-

potów z wykonaniem narzędzi odlewniczych. W tym kontekście zarówno aluminium, jak też magnez można uważać za pierwiastki niskotopliwe (ich temperatury topnienia wynoszą odpowiednio $T_{Al} = 660^\circ\text{C}$ oraz $T_{Mg} = 649^\circ\text{C}$). Tak więc stanowią one dobry materiał bazowy dla stopów do odlewania tiksotropowego. W niniejszej pracy postanowiono skoncentrować się na badaniach dotyczących stopów typu Al-Si oraz Mg-Al. Odpowiednie diagramy równowagi fazowej przedstawiono na rysunku 2 i warto tutaj wspomnieć, że formowanie stopów w stanie tiksotropowym zachodzi w



Rysunek 2. Układy fazowe: a) Al-Si, b) Mg-Al.

temperaturach z zakresu ograniczonego przebiegami linii solidus i likwidus.

W oparciu o wyniki wstępne postanowiono przeprowadzić systematyczne badania dla stopu aluminium z ok. 7% zawartością krzemu oraz dla stopu magnezu z ok. 8% zawartością aluminium (pełny, dokładny skład stopów jest podany w dalszej części artykułu). Badania dla stopu Al-Si mają charakter kompletny, natomiast badania dla stopu Mg-Al należy traktować jako pilotażowe. W rozdziałach 2 oraz 3 przedstawiono wyniki prac doświadczalnych. Natomiast rozdziały 4 oraz 5 zawierają wyniki odpowiednich prac obliczeniowych.

2. OTRZYMYWANIE STRUKTURY TIKSOTROPOWEJ

Materiał o strukturze globularnej (tiksotropowej) ze stopów aluminium jest w Polsce obecnie wytwarzany w Instytucie Metali Nieżelaznych, Oddział Metali Lekkich w Skawinie. Wlewki tego typu są otrzymywane w wyniku odpowiedniego zastosowania procesu półciągnego odlewania materiału z jednoczesnym magneto-hydrodynamicznym mieszaniem. Na rysunku 3 został przedstawiony schemat maszyny specjalnie skonstruowanej w Skawinie do tego celu. Maszyna ta jest przeznaczona do prowadzenia prac badawczych oraz ewentualnie do produkcji przemysłowej na małą skalę.

Magneto-hydrodynamiczne, objętościowe mieszanie kąpieli metalowej jest powodowane przez wzbudnik elektromagnetyczny otaczający krystalizator. Mieszanie takie zapobiega tworzeniu się nieregularnych dendrytów. Proces krystalizacji zachodzi natomiast pod wpływem wymuszonego chłodzenia wodą (podstawo-

wy element systemu chłodzącego to zbiornik wodny otaczający krystalizator). Stopień jednorodności struktury wlewka aluminiowego, otrzymywanego w wyniku półciągnego odlewania, zależy od kształtu frontu krystalizacji. Front krystalizacji na przekroju poprzecznym posiada tzw. V-kształtną postać. Uzyskiwana mikrostruktura jest tym bardziej jednorodna im bardziej dwie linie tworzące literę V na przekroju wlewka pozbawione są lokalnych krzywizn. Produkcja wlewów wymaga stosowania optymalizacji parametrów mieszania oraz warunków chłodzenia, gdyż ewentualne niejednorodności mikrostruktury powodują bardzo niepożądane niejednorodności własności mechanicznych. Wlewki produkowane w Instytucie Metali Nieżelaznych mają wstępnie średnicę ok. 115 mm. Jednak z uwagi na częściowy brak jednorodnej mikrostruktury przy powierzchni są poddawane procesowi skórowania (czyli procesowi polegającemu na usunięciu wierzchniej warstwy materiału wykazującej morfologię dendrytyczną) i ostatecznie mają średnicę ok. 90–100 mm.

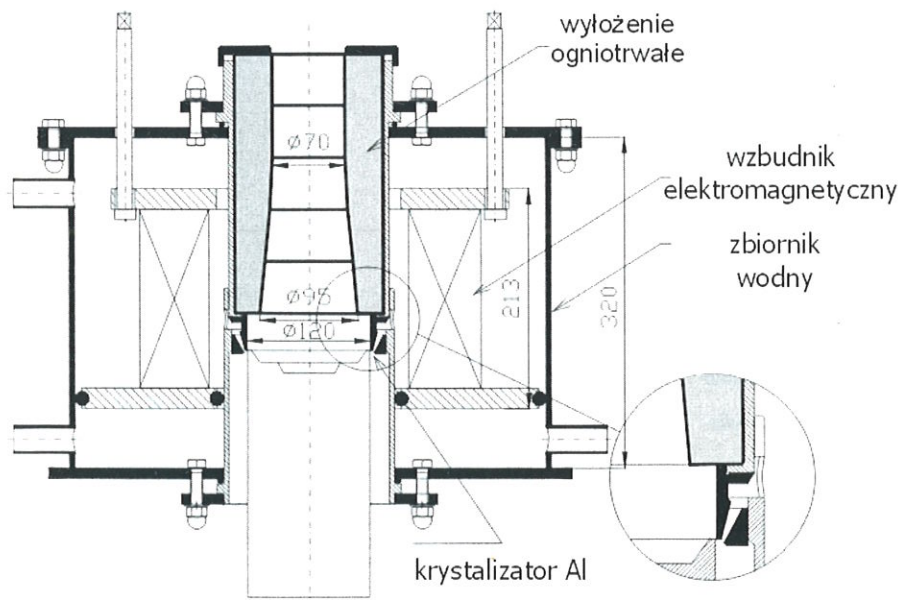
Wlewki o strukturze tiksotropowej ze stopów magnezu w chwili obecnej w Polsce na skalę przemysłową nie są produkowane. W Instytucie Odlewnictwa w Krakowie zbudowano stanowisko do otrzymywania w skali laboratoryjnej wlewów tego typu za pomocą mieszania mechanicznego oraz magneto-hydrodynamicznego. Stanowisko to zostało wykorzystane na potrzeby niniejszej pracy.

3. EKSPERYMENT

W ramach pracy wykonano doświadczalne odlewy tiksotropowe w Instytucie Odlewnictwa w Krakowie. Doświadczenie polegało na wykonaniu serii odlewów na maszynie ciśnieniowej. Do wykonania odlewów wykorzystano stopy aluminium A356

oraz magnezu AZ91. Skład chemiczny tych stopów zaprezentowano w tablicy 1.

Na podstawie doniesień literaturowych można przyjąć, że dla stopów odlewniczych formowanie powinno odbywać się w temperaturze zapewniającej udział od 40% do 60% fazy ciekłej. Taki udział tej fazy gwarantuje znaczny spadek sił formowania oraz stosunkowo niską segregację fazową (czyli nierównomierny przepływ faz). W przypadku stopu A356 udział 40–60% fazy ciekłej występuje w zakresie 19°C. Natomiast dla stopu AZ91 zakres ten wynosi 25°C. Warto tutaj dodać, że ponieważ dla stopu AZ91 dyskutowany zakres



Rysunek 3. Maszyna do otrzymywania wlewów o strukturze globularnej.



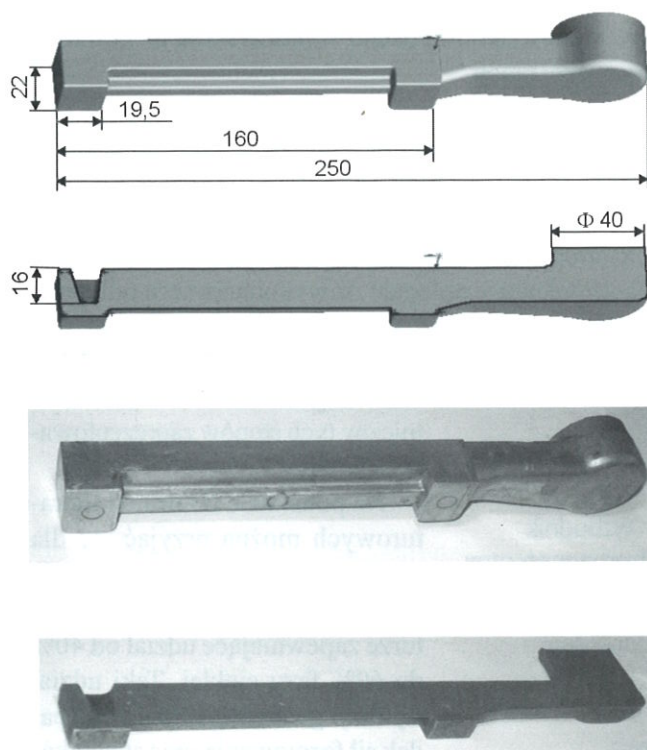
Tablica 1. Skład chemiczny stopów A356 oraz AZ91 (w %).

stop A356							
Si	Cu	Mg	Mn	Ni	Fe	Ti	Al
7,5	0,004	0,31	0,008	0,006	0,13	0,161	91,88

stop AZ91							
Al	Mn	Zn	Si	Cu	Ni	Fe	Mg
8,4	0,17	0,62	0,026	0,13	0,003	0,004	90,65

jest większy, w tym przypadku łatwiejsze jest formowanie materiału. Dopuszczalne są bowiem nieco większe niejednorodności temperatury w objętości wałków wsadowych oraz dopuszczalny jest większy spadek temperatury materiału spowodowany odpływem ciepła do formy.

Kształt odlewów został tak zaprojektowany, aby określić zdolność materiału do odwzorowania wnęk, krawędzi oraz rdzeni. Ponadto wymiary odlewów zostały tak ustalone, aby łatwe było wycinanie odpowiednich próbek do przeprowadzania analizy własności mechanicznych produktu końcowego. Podstawowe wymiary oraz zdjęcia odlewów zaprezentowane są na rysunku 4.



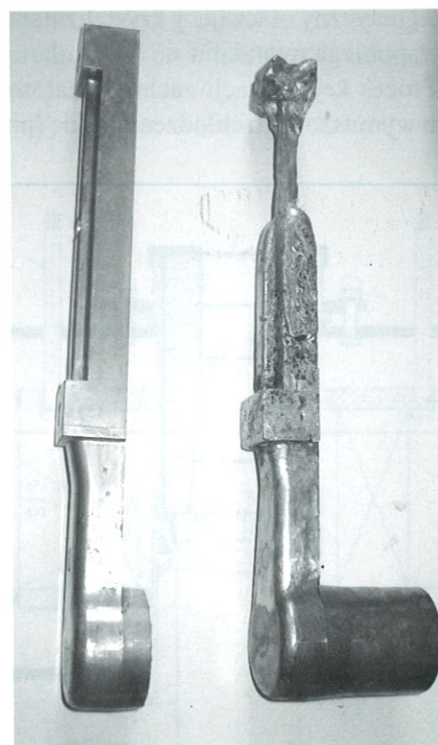
Rysunek 4. Podstawowe wymiary odlewów oraz zdjęcia odlewów.

Stanowisko do odlewania składało się z pieca sylvitowego oraz z hydraulicznej maszyny ciśnieniowej typu Bühler H-160B-B2, produkcji szwajcarskiej. Zastosowano układ wlewowy w postaci cylindra z tłokiem.

Forma do wypełniania była wykonana z wysokotopliwej stali narzędziowej do pracy na gorąco z gatunku WCL. Jako wsadu do procesu odlewania używano wałków o strukturze globularnej o średnicy 40 mm. Wałki te podgrzewano w piecu sylvitowym. W przypadku stopów magnezu, aby zapobiec ewentualnemu zapaleniu się wlewków zastosowano atmosferę ochronną złożoną z azotu (ok. 98% obj.) i sześćfluorku siarki (ok. 2% obj.). Gaz w sposób okresowy był podawany po osiągnięciu przez wlewek około 320°C, a w sposób ciągły po uzyskaniu temperatury 380°C.

W doświadczeniu odlewania przyjęto następujące wartości parametrów technologicznych: ciśnienie przetłaczania 170–200 MPa, prędkość tłoka 0,5–1,0 m/s, początkowa temperatura materiału 575–600°C, początkowa temperatura formy 170–180°C.

Niepoprawny dobór parametrów technologicznych może być przyczyną występowania wad odlewniczych.



Rysunek 5. Odlew wykonany poprawnie oraz odlew wykonany z wadą.

Mechanizm ich powstawania może być związany między innymi z nierównomiernym nagrzaniem materiału oraz segregacją fazową w trakcie formowania odlewu (czyli nierównomiernym przepływem faz spowodowanym różnicą ciśnień). Na rysunku 5 przedstawiono fotografie odlewu wykonanego poprawnie oraz odlewu, który zakrzepł przed kompletnym wypełnieniem formy. Ten drugi przypadek stanowi bardzo ciekawy przypadek wycisnięcia fazy ciekłej z wnętrza rozgrzanego materiału.

4. MODELOWANIE NUMERYCZNE PROCESÓW FORMOWANIA

W niniejszym rozdziale prezentowane są szczegóły przeprowadzenia symulacji wypełniania formy odlewniczej przez materiał. Pełne zrozumienie tego rozdziału wymaga od Czytelnika pewnego zasobu wiedzy z mechaniki ośrodków ciągłych. Aby jednak nie ograniczać liczby potencjalnych Czytelników prezentowanego artykułu, rozdział ten jest napisany tak, aby stanowił przede wszystkim uzupełnienie pozostałych części pracy, tzn. może zostać opuszczony przy pierwszym czytaniu.

Tak więc do przeprowadzenia analizy teoretycznej procesu wypełniania formy odlewniczej przedstawionego w rozdziale 3 został wykorzystany pakiet komputerowy FORGE3[®], który warto tutaj krótko scharakteryzować. Pakiet ten, bazujący na metodzie elementów skończonych, jest zasadniczo przeznaczony do symulacji procesów przeróbki plastycznej (głównie kucia na zimno i na gorąco). Pakiet FORGE3[®] może być jednak łatwo zaadaptowany do symulacji procesów odlewniczych. Ale oznacza to w praktyce zastosowanie metody Lagrange'a do opisu przepływu materiału. W opisie Lagrange'a siatka punktów węzłowych przemieszcza się wraz z materiałem. W dziedzinie odlewnictwa stosowanie takiego podejścia jest raczej nietypowe. Do modelowania przepływu ciekłych metali lub ich stopów badacze stosują zazwyczaj siatki nieruchome, czyli związane bezpośrednio z geometrią formy odlewniczej. Jest to tzw. opis Eulera, sprawiający mniej trudności koncepcyjnych przy analizie matematycznej zagadnienia. Wykonując obliczenia numeryczne przy zastosowaniu siatek nieruchomych stosunkowo trudno jest śledzić dokładnie front przesuwanego się materiału (można to osiągnąć stosując mocno zagęszczoną siatkę, ale czas obliczeń staje się wówczas duży). Jednak w odlewaniu tradycyjnym wypełnianiu formy zazwyczaj towarzyszą turbulencje i dlatego bardzo dokładne modelowanie frontu mija się nieco z celem. Tak więc użycie opisu Eulera jest wówczas zwykle zadawalające. Natomiast odlewanie tiksotropowe, omawiane w niniejszym artykule, ma inny charakter. Jest to proces

regularny i przepływ materiału ma charakter laminarny. W tym przypadku mamy do czynienia z odlewaniem precyzyjnym i uzasadnione staje się dokładne śledzenie frontu materiału. Zastosowanie w niniejszej pracy programu FORGE3[®], z wykorzystaniem opisu Lagrange'a, okazało się bardzo trafne.

4.1. Model mechaniczny procesu formowania materiałów w stanie stało-ciekłym

Lepkoplastyczny model ciała jest z powodzeniem stosowany w symulacjach odkształceń plastycznych na gorąco. Model ten może być również stosowany w symulacjach formowania materiału w stanie stało-ciekłym. Lepkoplastyczny model materiału w programie FORGE3[®] jest opisywany prawem Nortona-Hoffa, które można zapisać w następujący sposób:

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{2K(T)} (\sqrt{3}\dot{\bar{\epsilon}})^{1-m(T)} \mathbf{s}, \quad (1)$$

gdzie $\dot{\epsilon}$ oznacza tensor prędkości odkształcenia, \mathbf{s} dekwator naprężenia, T temperaturę, K lepkoplastyczną konsystencję, m współczynnik wrażliwości na prędkość odkształcenia oraz $\dot{\bar{\epsilon}}$ intensywność prędkości odkształcenia. Warto podkreślić, że w równaniu (1) lepkoplastyczna konsystencja K i parametr m są funkcjami temperatury T . Wrażliwość prędkości odkształcenia m może przyjmować następujące wartości:

- $m = 0,2$ dla materiału odkształcanego plastycznie w stanie stałym,
- $m = 1,0$ dla stanu ciekłego, odpowiadającemu płynowi Newtona,
- $m \in (0,2; 1,0)$ dla stanu stało-ciekłego.

Przyjmuje się, że wartość $m = 0,2$ oznacza brak fazy ciekłej, zaś $m = 1,0$ brak fazy stałej w stopie.

Program FORGE3[®] działa w oparciu o metodę elementów skończonych. W celu wyznaczenia deformacji materiału wprowadza się lepkoplastyczny potencjał $\varphi(\dot{\epsilon})$ (Chenot i Bellet 1992, Wagoner i Chenot 1997, Wagoner i Chenot 2001):

$$\varphi(\dot{\epsilon}) = \frac{K}{m+1} \cdot (\sqrt{3} \dot{\bar{\epsilon}})^{m+1}, \quad (2)$$

i rozwiązanie postawionego zadania jest otrzymywane poprzez minimalizację następującego funkcjonału:

$$\Phi(\mathbf{v}) = \int_{\Omega} \varphi(\dot{\epsilon}) dV - \int_{\Gamma} \mathbf{T}^d \cdot \mathbf{v} dS, \quad (3)$$

gdzie: \mathbf{v} – prędkość materiału, Ω – objętość, Γ – powierzchnia ograniczająca materiał, \mathbf{T}^d – naprężenie styżne.

Jednak, aby wykonać obliczenia przy pomocy programu FORGE3[®], użytkownik musi przede wszystkim



określić w pełni model materiału, tj. podać przebieg funkcji $m(T)$ oraz $K(T)$. W niniejszej pracy, dla stopu A356, przyjęto następującą postać tych funkcji:

$$K(T) = 0,1 + 19999999,9 \cdot \left[\frac{k_f}{1 + \exp\left(\frac{T - k_{c1}}{k_{a1}}\right)} + \frac{1 - k_f}{1 + \exp\left(\frac{T - k_{c2}}{k_{a2}}\right)} \right], \quad (4)$$

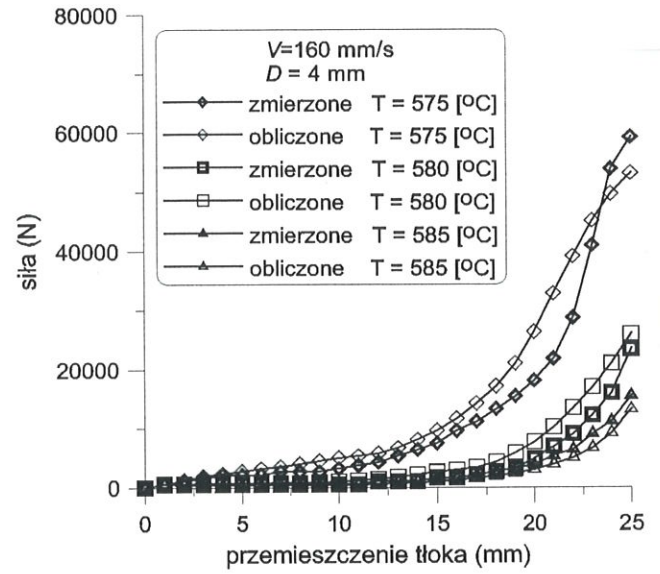
$$m(T) = 1 - 0,8 \cdot \left[\frac{m_f}{1 + \exp\left(\frac{T - m_{c1}}{m_{a1}}\right)} + \frac{1 - m_f}{1 + \exp\left(\frac{T - m_{c2}}{m_{a2}}\right)} \right], \quad (5)$$

gdzie parametry z równań (4) i (5) mogą być traktowane jako składowe pewnego wektora \mathbf{p} , gdzie $\mathbf{p} = [k_{a1}, k_{a2}, k_f, k_{c1}, k_{c2}, m_{a1}, m_{a2}, m_f, m_{c1}, m_{c2}]$. Wzory (4) oraz (5) podano przy założeniu, że T jest wyrażone w $^{\circ}\text{C}$, $K(T)$ w $\text{Pa} \times \text{s}^m$, natomiast $m(T)$ jest bezwymiarowe. Wyznaczenie wartości tych parametrów przeprowadzono metodą odwrotną (np. Szyndler i Pietrzyk 2000, Szyndler i in. 2001), w oparciu o testy materiałowe dla stopu A356 zaczerpnięte z literatury (Bellet i Mpong 2001). W przeprowadzonej analizie poszukiwano wektora \mathbf{p}^{opt} , dla którego zachodzi:

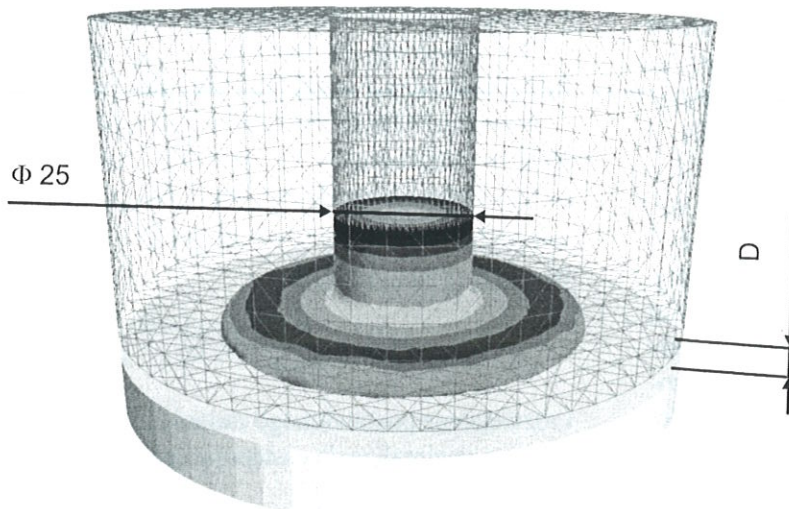
$$\Phi(\mathbf{p}^{\text{opt}}) = \min\{\Phi(\mathbf{p})\},$$

$$\Phi(\mathbf{p}) = \left[\frac{1}{N_{\text{exp}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{exp}}} \left\{ \frac{1}{N_m} \sum_{j=1}^{N_m} \left(\frac{F_{ij}^c - F_{ij}^m}{F_{ij}^m} \right)^2 \right\} \right]^{1/2}, \quad (6)$$

gdzie: $\Phi(\mathbf{p})$ – funkcja błędu, N_{exp} – liczba testów materiałowych, N_m – liczba punktów pomiarowych, $F_{i,j}^m$ – wartość siły o numerze 'j' zmierzona w teście o numerze 'i', $F_{i,j}^c$ – wartość siły o numerze 'j' obliczona dla



Rysunek 7. Zmierzone i obliczone siły dla testów wykonanych w matrycy o szerokości szczeliny równej 4 mm i prędkości tłoka 160 mm/s.



- D = 4 mm, V = 160 mm/s
T₀ = 575, 580, 585 °C
- D = 4 mm, V = 80 mm/s
T₀ = 575, 580 °C
- D = 2 mm, V = 80 mm/s
T₀ = 580, 585 °C

Rysunek 6. Testy materiałowe zaprojektowane do określenia reologii materiału w stanie stało-ciekłym. Szerokość szczeliny formy wynosi 4 mm oraz 2 mm.

Tablica 2. Wartości parametrów reologicznych.

k_{a1} [°C]	k_{a2} [°C]	k_f [-]	k_{c1} [°C]	k_{c2} [°C]	m_{a1} [°C]	m_{a2} [°C]	m_f [-]	m_{c1} [°C]	m_{c2} [°C]
0,57811	1,55562	0,257	561,705	565,904	3,73476	4,76661	0,526	571,893	581,325

testu o numerze 'l'. W analizie uwzględniono siedem testów reologicznych różniących się temperaturą początkową materiału, prędkością odkształcenia oraz kształtem formy (rysunek 6).

Minimalizacja funkcji błędu została przeprowadzona przy pomocy metody simplex. W jej trakcie przeprowadzono dwadzieścia iteracji. Rezultaty analizy odwrotnej zostały zaprezentowane w tabelicy 2.

Zmierzone i obliczone siły dla testów wykonanych w matrycy o szerokości szczeliny równej 4 mm i prędkości tłoka 160 mm/s pokazano na rysunku 7.

4.2. Efekt cieplny przemiany fazowej

Zachowanie materiału w stanie stało-ciekłym jest bardzo wrażliwe nawet na niewielkie, lokalne zmiany temperatury. Dlatego rozkład temperatury w symulacjach formowania takich materiałów powinien być wyznaczany precyzyjnie. W szczególności należy uwzględnić wpływ przemiany fazowej na rozkład temperatury. Można to osiągnąć wprowadzając z pomocą entalpii ciepło krystalizacji do równania przewodnictwa:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T), \quad (7)$$

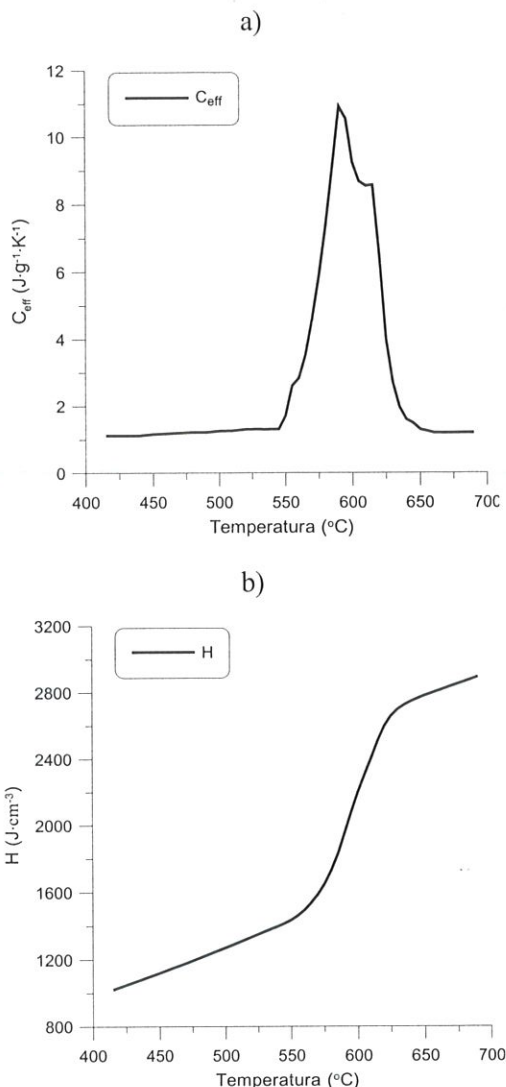
gdzie: H – entalpia, k – przewodnictwo cieplne, t – czas. Teoretyczną dyskusję odnośnych zagadnień można znaleźć w podręcznikach dotyczących przepływu ciepła podczas krzepnięcia (np. Perzyk i in. 2000). Możliwe jest stosowanie różnych podejść numerycznych, np. można stosować metodę entalpii, efektywnej pojemności cieplnej itd. (np. Reddy i Gartling 2001). Formalnie, dla przemiany fazowej zachodzącej w przedziale temperatur pomiędzy temperaturą solidus T_s i temperaturą likwidus T_l , wartości entalpii można wyznaczyć z następującego wyrażenia:

$$H(T) = \int_{T_0}^{T_s} \rho(T) \cdot c_p(T) dT + \int_{T_s}^T \left[\rho(T) \cdot \left(\frac{dL}{dT} \right) + \rho(T) \cdot c_p(T) \right] dT, \quad (8)$$

gdzie: ρ – gęstość, c_p – ciepło właściwe, L – ciepło przemiany, T_0 – temperatura odniesienia (np. pokojowa). Równanie (8) można także zapisać w następującej postaci:

$$H(T) = \int_{T_s}^T \rho(T) \cdot c_{eff}(T) dT, \quad (9)$$

gdzie c_{eff} oznacza tzw. efektywne ciepło właściwe, które można eksperymentalnie wyznaczać stosując metodę różniczkowej analizy termicznej (ang. differential thermal analysis). Doświadczalne krzywe prezentujące



Rysunek 8. Parametry przemiany fazowej stopu aluminium A356: a) efektywne ciepło właściwe w funkcji temperatury, b) entalpia w funkcji temperatury.

$c_{eff}(T)$ można znaleźć w tablicach wielkości metalurgicznych lub w bazach danych dostarczanych przez producentów oprogramowania poświęconego modelowaniu procesów odlewniczych (np. bazę danych tego typu opracowali producenci programu MAGMASOFT® - Hepp i in. 2000). Na rysunku 8a przedstawiono wartości c_{eff} dla stopu A356, na rysunku 8b przedstawiono zaś odpowiednie wartości H .

5. SYMULACJA

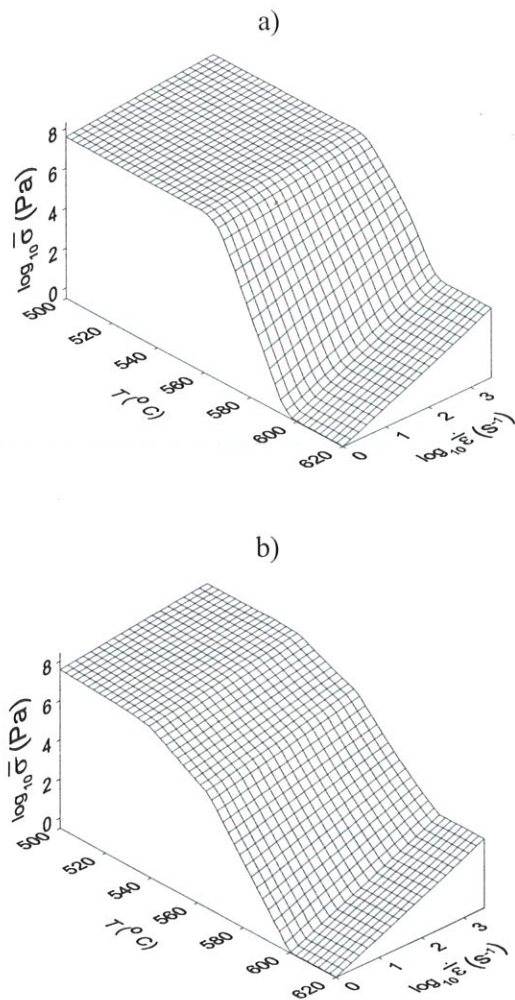
Symulacje komputerowe ciśnieniowego odlewania tiktotropowego wykonano przy pomocy programu FORGE3® (przeznaczonego do symulacji trójwymiarowych). Zostały one wykonane dla stopu aluminium A356 oraz magnezu AZ91. Charakterystykę materiałów zaczerpnięto z literatury (Bellet i Mpong 2001, Chino i in. 2003). W przypadku stopu A356 dane reologiczne zostały otrzymane z analizy odwrotnej opisanej w rozdziale 4, przeprowadzonej dla testów mate-



riałowych zaczerpniętych z pracy Bellet i Mpong (2001). Odnośnie zaś stopu AZ91, to praca Chino i in. (2003) zawiera dane reologiczne dla zakresu temperatur 440–540°C. Drogą ekstrapolacji uzyskano dane dla zakresu temperatur występującego w eksperymencie odlewania. Na rysunku 9 przedstawiono wykresy zależności intensywności naprężenia od temperatury i prędkości odkształcenia dla stopu A356 i AZ91.

Ostatecznie przyjęto też następujące parametry w symulacjach – początkowa temperatura materiału: 580°C – stop aluminium, 575°C – stop magnezu, początkowa temperatura formy: 220°C – stop aluminium, 180°C – stop magnezu, prędkość tłoka 0,6 m/s. Współczynnik wymiany ciepła pomiędzy formą i materiałem przyjęto 1000 Wm⁻²K⁻¹. W symulacjach założono przyleganie materiału do narzędzia.

Symulacje dla stopu magnezu AZ91 mają charakter wstępnych badań na ten temat. Jest to związane z faktem, że odnośne prace eksperymentalne w Polsce, w Instytucie Odlewnictwa zostały rozpoczęte bardzo niedawno. Wymagają więc one jeszcze dalszego uściślenia odnośnie znalezienia optymalnych warunków otrzy-



Rysunek 9. Intensywność naprężenia w funkcji temperatury i prędkości odkształcenia dla stopu: a) A356 i b) AZ91.

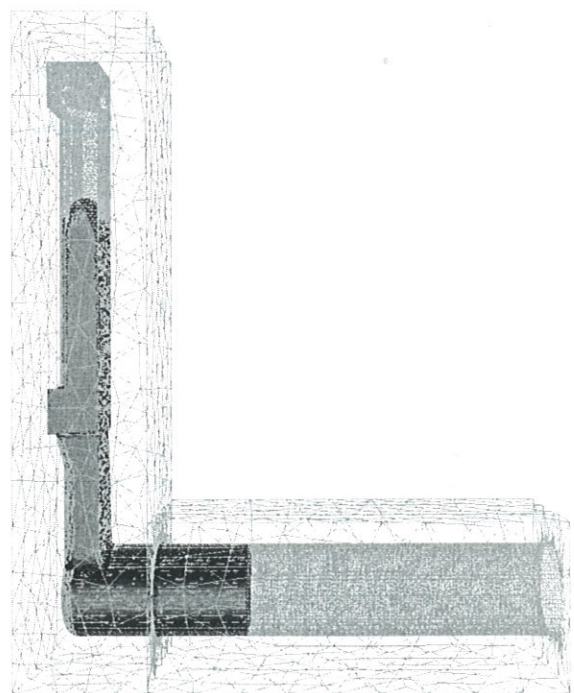
wania odlewów, dokładnego wyznaczenia parametrów odlewania itp. Przeprowadzone symulacje stanowią w tym względzie dużą pomoc, gdyż pozwalają na pełniejsze sprecyzowanie kierunków dalszych badań. Na rysunku 10 został przedstawiony jest schemat narzędzi oraz wsadu zastosowany w programie FORGE3[®] do symulacji wypełniania wnęki odlewniczej stopem AZ91.

Szczegółowe porównanie wyników doświadczalnych oraz komputerowych przeprowadzono zaś dla stopu A356. Warto podkreślić, że program FORGE3[®] umożliwia precyzyjne śledzenia frontu materiału. Na rysunku 11 przedstawiono porównanie wyników symulacji z tzw. częściowym odlewem (czyli odlewem zakrzepłym w trakcie wypełniania formy odlewniczej).

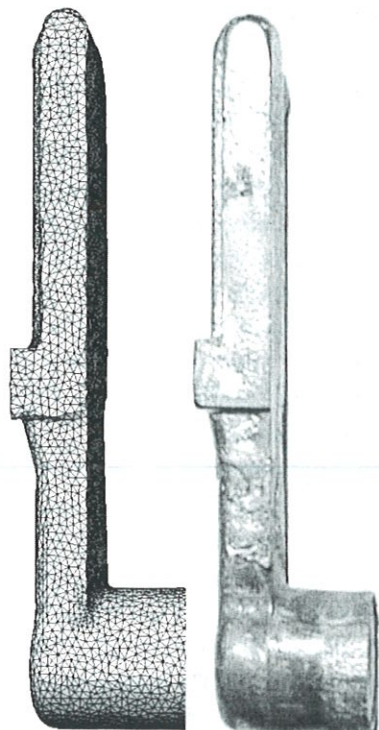
Przy pomocy symulacji można analizować nawet tak subtelne wady jak występowanie nieciągłości w odlewanych materiale. Na rysunku 12 zaprezentowano fotografię przekroju próbki ze stopu aluminium z ujawnioną strefą martwą oraz wyniki symulacji z rozkładem prędkości materiału.

Na rysunku 13 zaprezentowano wyniki symulacji odlewania stopu A356 ukazujące prezentujące rozkład temperatury, ciśnienia oraz lepkości w całej objętości formowanego materiału. Rozkład temperatury na rysunku 13a wykazuje duży stopień korelacji z rozkładem lepkości materiału zaprezentowanym na rysunku 13c.

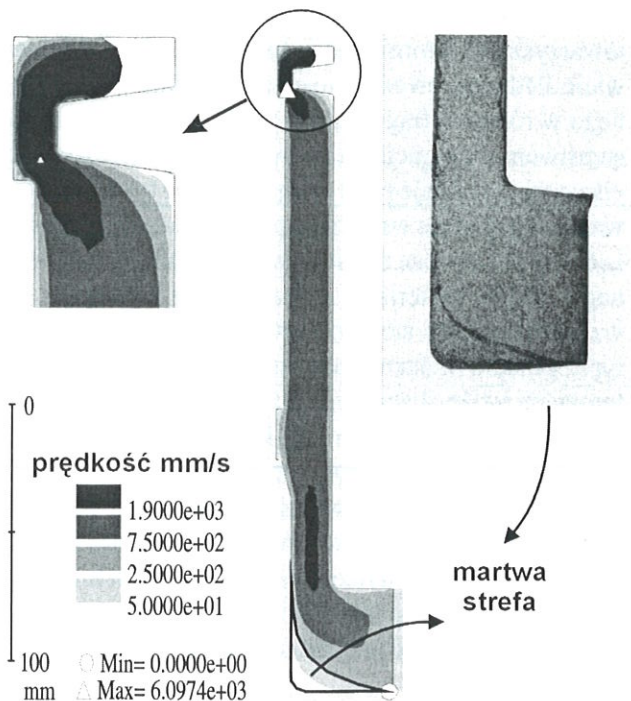
W podsumowaniu tego rozdziału warto omówić główne cechy modelu zastosowanego w symulacjach komputerowego, tj. wskazać jego wady i zalety. Otóż w symulacjach zastosowano tzw. jednofazowy model



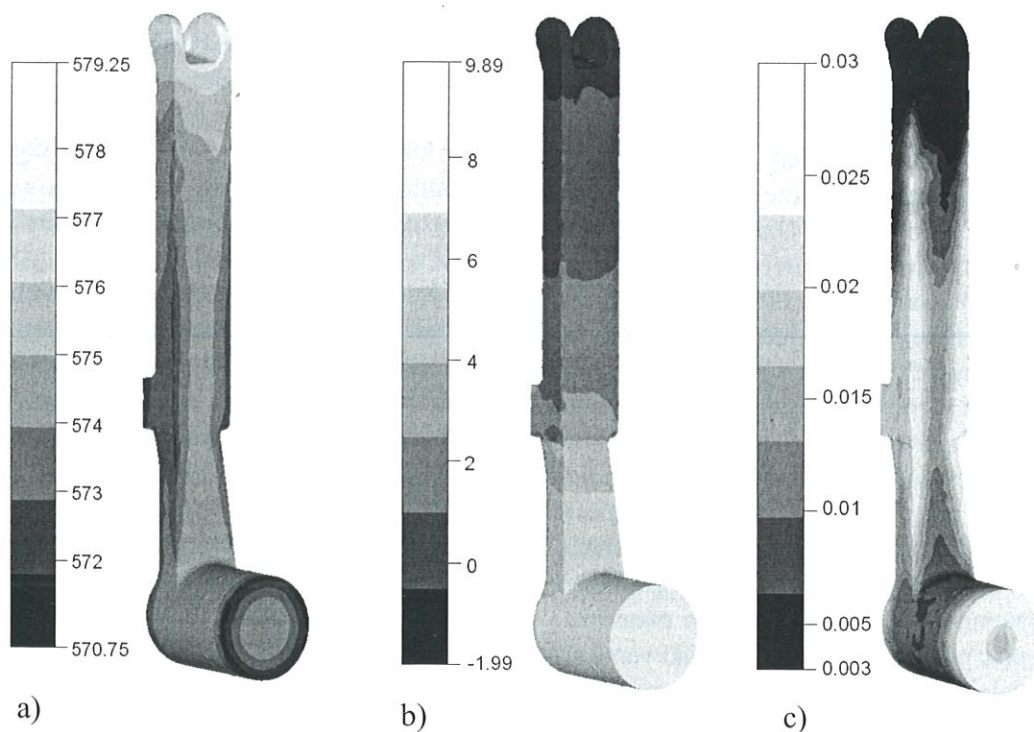
Rysunek 10. Przykład symulacji wypełniania formy odlewniczej stopem AZ91.



Rysunek 11. Porównanie wyników symulacji z eksperymentem dla stopu A356. Po lewej siatka elementów skończonych, a po prawej częściowy odlew.



Rysunek 12. Porównanie wyników symulacji z eksperymentem. Zaprezentowana symulacja ujawnia występowanie strefy martwej.



Rysunek 13. Symulacje programem FORGE3® procesu odlewania stopu A356: a) rozkład temperatury ($^{\circ}\text{C}$), b) rozkład ciśnienia (MPa), c) rozkład lepkości materiału (MPa·s) dla czasu $t = 0,18$ s.

materiału. Oznacza to, że fakt współlistnienia fazy ciekłej i stałej potraktowano w uśredniony (uproszczony) sposób. Przy zastosowaniu tego modelu możliwe było przeprowadzenie bardzo udanych, trójwymiarowych sy-

mulacji procesu wypełniania wnęki. W symulacjach tych śledzono zarówno przepływ materiału oraz towarzyszące mu zmiany pola temperatury. Jednak warto w tym miejscu podkreślić, że w ramach zastosowanego



podjęcia nie można analizować wszystkich efektów towarzyszących formowaniu tiksotropowemu. Mianowicie śledzenie ewentualnych zmian składu chemicznego w różnych fragmentach produktu, będących następstwem segregacji faz pod wpływem przyłożonego ciśnienia, pozostaje poza zasięgiem tego typu modelowania. Wydaje się więc, że w przyszłości warto rozwinąć prace badawcze z zastosowaniem mikrostrukturalnego modelu materiału. Jednak należy zaznaczyć, że względu na duży stopień komplikacji podejścia tego typu, przeprowadzenie odnośnych symulacji komputerowych może okazać się możliwe tylko dla pewnych szczególnych sytuacji. W tym kontekście interesująco przedstawia się propozycja zastosowania częściowo uśrednionych modeli dwufazowych (Kang i Chung 2001, Petera i in. 2002), w których faza ciekła i stała w ujęciu statystycznym rozpatrywane są oddzielnie. Jednak w tej chwili jest jeszcze zbyt wcześnie aby można było dokonać oceny przydatności modeli tego typu.

6. PODSUMOWANIE

W niniejszym artykule przedstawiono szczegółową analizę procesów odlewania tiksotropowego, prezentując zarówno wyniki doświadczalne oraz numeryczne. Na podkreślenie zasługuje, że uzyskano dużą zgodność wyników eksperymentalnych z wynikami zaawansowanych symulacji komputerowych.

W podsumowaniu warto omówić główne cechy podejścia zastosowanego w modelowaniu komputerowego, tj. wskazać jego wady i zalety. Otóż modelując proces wypełniania wnęki odlewniczej zastosowano tzw. jednofazowy model materiału. Oznacza to, że fakt współistnienia fazy ciekłej i stałej potraktowano w uproszczony (uśredniony) sposób. Dzięki takim uproszczeniom było możliwe przeprowadzenie bardzo udanych, trójwymiarowych symulacji procesu wypełniania wnęki, śledząc zarówno przepływ materiału oraz towarzyszące mu zmiany pola temperatury. Jednak warto w tym miejscu podkreślić, że w ramach zastosowanego podejścia nie można analizować wszystkich efektów towarzyszących formowaniu tiksotropowemu, między innymi segregacji faz wynikającej z gradientu ciśnienia występującego w formowanym materiale. Kolejny etap prac powinien stanowić poszukiwanie algorytmu pozwalającego opisać tego rodzaju zjawiska, jak również powinien dążyć do udoskonalenia technik pomiarowych pozwalających na łatwy pomiar własności reologicznych.

W pracy przedstawiono trójwymiarowe symulacje procesu wypełniania formy odlewniczej. W tym celu został wykorzystany program FORGE3[®] oparty na rozwiązaniu modelu termomechanicznego przy pomocy metody elementów skończonych. Program ten bazuje

na schemacie Lagrange'a, który pozwala na precyzyjne zamodelowanie zmian frontu materiału podczas wypełniania wnęki formy. Zastosowanie schematu Lagrange'a w odniesieniu do procesów formowania tiksotropowego jest rzadkim i oryginalnym podejściem.

Rezultaty niniejszej pracy potwierdzają przypuszczenie, że w najbliższej przyszłości modelowanie i symulacje komputerowe mogą stać głównymi narzędziami prac projektowych. Można więc np. oczekiwać, że zakłady przemysłowe będą zainteresowane zatrudnianiem specjalistów z tego zakresu. Prawdopodobnie badania komputerowe pozwolą w niedalekiej przyszłości na istotne zmniejszenie kosztów prac projektowych. Brzmi to dość optymistycznie, gdyż powszechnie przyjmuje się, że zmniejszanie kosztów funkcjonowania zakładów przemysłowych jest rzeczą pozytywną. Tak jest w istocie, jednak jeśli nie towarzyszą temu procesowi odpowiednie procedury transformacyjne dotyczące gospodarki całego kraju, może stać się on przyczyną napięć społecznych. Warto więc poświęcić tej sprawie kilka zdań komentarza. Zmniejszenie kosztów funkcjonowania zakładów przemysłowych może prowadzić do tego, że tę samą ilość towarów będzie w stanie wytworzyć mniejsza liczba osób. Jeśli osoby 'zbędne' w przemyśle znajdą zatrudnienie w sektorze usług, to oczywiście wpłynie to pozytywnie na poziom życia wszystkich obywateli w kraju. Jednak, aby to faktycznie się wydarzyło w praktyce, konieczne jest stosowanie różnego rodzaju działań stymulujących, w tym np. przeprowadzanie reorganizacji systemu edukacji. W tym kontekście wydaje się ważne aby wyższe uczelnie techniczne modyfikowały odpowiednio szybko swoje programy kształcenia, jak również aby kontrolowały ogólną liczbę absolwentów opuszczających mury uczelni. Jest raczej oczywiste, że w nowych programach kształcenia powinno znaleźć się wiele różnych zajęć dotyczących szeroko rozumianej informatyki. Ale wydaje się też, że skoro w nowoczesnym, zautomatyzowanym przemyśle zatrudnienie może znaleźć coraz mniejszy odsetek ludności, to niestety może stać się konieczne także stopniowe zmniejszanie całkowitej liczby studentów uczelni technicznych. Jest to teza bardzo kontrowersyjna i wymagająca jeszcze dalszej dokładniejszej analizy, jednak w żadnym wypadku nie należy jej lekceważyć. Warto więc dodać, że w krajach wysoko rozwiniętych, wszechstronnej analizie skutków postępu technologicznego poświęca się dość dużo miejsca. Na tej podstawie prognozuje się strukturę zatrudnienia korzystną dla gospodarki i jednocześnie akceptowalną społecznie (np. Feather 2000). W każdym razie wydaje się ważne, aby także w polskiej rzeczywistości dostrzegać źródła potencjalnych problemów możliwie wcześniej, i aby prowadzić na ten temat rzetelną dyskusję opartą na chłodnej ocenie sytuacji.

PODZIĘKOWANIE

Praca była finansowana przez Komitet Badań Naukowych, numer projektu 7 T08B 042 21.

LITERATURA

- Atkinson, H.V., 2002, Thixoforming of otherwise wrought aluminium alloys: thermodynamic prediction of amenable compositions, *Mat. Konf. 5th Int. Conf. on Material Forming ESAFORM*, ed., Pietrzyk, M., Mitura, Z., Kaczmar, J., Kraków, 655-658.
- Bellet, M., Mpong, S.M., 2001, Determination of the constitutive equation parameters of a thixotropic Al alloy and FEM modelling of the thixoforming process, *Mat Konf. NUMIFORM '01*, ed., Mori, K., Lisse, 1087-1092.
- Chenot, J.-L., Bellet, M., 1992, The Viscoplastic Approach for the Finite-Element Modelling of Metal-Forming Processes, *Praca Zbiorowa Numerical Modelling of Material Deformation Processes*, ed., Hartley, P., Pillinger, I., Sturgess, C., London, 179-224.
- Chino, Y., Kobata, M., Iwasaki, H., Mabuchi, M., 2003, An investigation of compressive deformation behaviour for AZ91 Mg alloy containing a small volume of liquid, *Acta Materialia*, 51, 3309-3318.
- Feather, F., 2000, *Canada's best careers guide 2000*, Warwick Publishing, Toronto.
- Hepp, E., Neves, S., Egry, I., 2000, High precision measurement of thermophysical properties for liquid metals - requirements for simulation of foundry processes, *Mat Konf. Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes IX*, ed., Sahn, P. R., Hansen, P. N., Conley, J. G., 697-703.
- Kang, C. G., Chung, Y. J., 2001, Comparison of single-phase and two-phase flow for numerical analysis of semi-solid forming process, *Mat Konf. NUMIFORM '01*, ed., Mori, K., Toyohashi, 1079-1085.
- Kopp, R., Lugscheider, E., Hornig, T., Kallwiet, J., Maes, M., Seidl, I., 2002, Forming experiments and die development for processing steels in the semi-solid range, *Mat. Konf. 5th Int. Conf. on Material Forming ESAFORM*, ed., Pietrzyk, M., Mitura, Z., Kaczmar, J., Kraków, 671-674.
- Łapkowski, W., Pietrzyk, M., Sińczak, J., 1992, Behaviour of metal alloys during plastic deformation in partly liquid state, *J. Mater. Proc. Techn.*, 34, 481-488.
- Łapkowski, W., Pietrzyk, M., 1994, Some aspects of plastic deformation of metal alloys in partly liquid state, *J. Mater. Proc. Techn.*, 45, 365-370.
- Łapkowski, W., 1998, Some studies regarding thixoforming of metal alloys, *J. Mater. Proc. Techn.*, 80-81, 463-468.
- Mori, K., ed., 2001, *Mat Konf. NUMIFORM '01*, A.A. Balkema Publishers, Lisse.
- Petera, J., Modigell, M., Hufschmidt, M., 2002, Comparison of two-phase finite simulation with experiments on isothermal die filling of semi-solid tin-lead, *Mat. Konf. 5th Int. Conf. on Material Forming ESAFORM*, ed., Pietrzyk, M., Mitura, Z., Kaczmar, J., Kraków, 675-678.
- Perzyk, M., Iwaszkiewicz, S., Kaczorowski, M., Jopkiewicz, A., 2000, *Odlewnictwo*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Pietrzyk, M., Mitura, Z., Kaczmar, J., ed., 2002, *Mat. Konf. 5th Int. Conf. on Material Forming ESAFORM*, Akapit, Kraków.
- Reddy, J. N., Gartling, D. K., 2001, *The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics*, CRC Press, London.
- Sahn, P.R., Hansen, P.N., Conley, J.G., ed., 2000, *Mat Konf. Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes IX*, Shaker Verlag GmbH, Aachen.
- Szyndler, D., Pietrzyk, M., 2000, Inverse analysis applied to the evaluation of friction and rheological parameters in hot forming of steels, *Mat. Konf. Metal Forming '00*, ed., Pietrzyk, M., Kusiak, J., Majta, J., Hartley, P., Pillinger, I., Kraków, 101-106.
- Szyndler, D., Pietrzyk, M., and Kuziak, R., 2001, Estimation of rheological and friction parameters in hot forming processes as inverse problem, *Mat. Konf. ESAFORM '01*, ed., Habracken, A. M., Liege, 191-194.
- Wagoner, R.H., Chenot, J.-L., 1997, *Fundamentals of metal forming*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Wagoner, R.H., Chenot, J.-L., 2001, *Metal Forming Analysis*, Cambridge University Press, Cambridge.

Artykuł otrzymano 25 września 2003 r.

