

**BADANIE KINETYKI KRZEPNIĘCIA I STYGNIĘCIA MASY  
MODELOWEJ W MATRYCY****THE STUDY OF THE KINETICS OF SOLIDIFICATION AND COOLING  
OF PATTERN MATERIAL IN A DIE**

*Jerzy Stachańczyk, Rafał Pabiś*

*Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

**Streszczenie**

*W artykule zaprezentowano opracowaną metodykę badań pozwalającą na ocenę kinetyki krzepnięcia i stygnięcia mas modelowych w formie metalowej – matrycy. Przedstawiono zastosowaną aparaturę oraz wyniki badań wytypowanych mas modelowych. Określono szybkość krzepnięcia i stygnięcia przy zmiennych parametrach przebiegu procesu technologicznego.*

Słowa kluczowe: *kinetyka krzepnięcia, masy modelowe, stygnięcie, proces technologiczny*

**Abstract**

*The article presents the developed research methodology that allows the evaluation of the kinetics of solidification and cooling of pattern material in a metal mould ( die). The apparatus was described and the results of investigations carried out on selected pattern materials were presented. The solidification and cooling rate under the variable parameters of a technological process was determined.*

Key words: *kinetics of solidification, pattern material, cooling, technological process*

## Wstęp

Nowoczesne odlewnictwo precyzyjne w swoim założeniu dąży do uzyskania wyrobu najwyższej jakości. Cel ten można uzyskać, realizując ustalony proces wytwórczy składający się z kilkunastu operacji technologicznych, do których należy między innymi wykonawstwo wytapianych modeli. Jakość uzyskanych modeli to jeden z podstawowych parametrów decydujących o prawidłowym przebiegu procesu technologicznego i uzyskanym efekcie końcowym – odlewie precyzyjnym [1].

O jakości modeli decydują [3, 4]:

- właściwości mas modelowych,
- właściwości charakteryzujące proces wykonywania modeli,
- konstrukcja i dokładność wykonania oprzyrządowania,
- parametry charakteryzujące pracę urządzeń wtryskowych.

Masa modelowa służąca do produkcji modeli to skomplikowana mieszanina różnych związków chemicznych (węglowodory, kwasy tłuszczowe, tworzywa sztuczne, żywice syntetyczne, wypełniacze organiczne, modyfikatory, barwniki), co stwarza różnorodną kombinację możliwości opracowania receptur składu o określonych właściwościach [2]. Taka budowa charakteryzuje również nietypową zmianę skupienia masy modelowej ze stanu stałego w ciekły, charakteryzującą się brakiem wyraźnej wyznaczonej temperatury topnienia i wystąpieniem stanów przejściowych (masa o konsystencji pasty) [5]. Charakterystyczna dla mas modelowych jest również krzywa wartości rozszerzalności cieplnej, wskazująca na wyraźną zależność rozszerzalności od temperatury [3, 6].

Aktualnie prowadzone badania mas modelowych pozwalają na ocenę właściwości:

- fizykochemicznych (temperatura krzepnięcia, temperatura kroplenia, temperatura łamliwości, penetracja, zawartość popiołu),
- reologicznych (lepkość kinematyczna, lepkość dynamiczna),
- technologicznych (skurcz liniowy, odkształcalność – zdolność zachowania kształtu, wytrzymałość na zginanie) [6, 7].

Autorzy publikacji proponują rozszerzenie zakresu badań technologicznych o opis procesu krzepnięcia i stygnięcia masy modelowej w formie metalowej (matrycy).

Proces krzepnięcia i stygnięcia mas modelowych przebiega w dwóch następujących po sobie okresach temperaturowych:

- 1 – od temperatury stopionej masy do temperatury prasowania,
- 2 – od temperatury prasowania do temperatury otoczenia.

Pierwszy okres procesu krzepnięcia wpływa na przebieg operacji przygotowania masy modelowej. O szybkości przebiegu tego procesu decyduje przede wszystkim temperatura ciekłej masy modelowej, jej ilość oraz rodzaj stosowanego ośrodka do jej ochłodzenia. Parametry charakteryzujące ten okres krzepnięcia nie decydują o przebiegu procesu wykonywania modeli, natomiast okres drugi wpływa w sposób zasadniczy na wydajność urządzeń do wykonywania modeli. Okres ten charakteryzuje krzepnięcie i stygnięcie masy modelowej od momentu wprowadzenia jej do matrycy do czasu usunięcia modelu z matrycy. Parametrem, który decyduje o przebiegu tego okresu, jest prędkość krzepnięcia i stygnięcia masy modelowej, wyznaczona jako stosunek spadku wartości temperatury do czasu, w którym ten spadek nastąpił. Określa ona przebieg operacji prasowania masy modelowej – krzepnięcia i stygnięcia modeli w matrycy. Dla zwiększenia prędkości konstruuje się matryce chłodzone dodatkowo wodą [5]. W przypadku grubych przekrojów modeli stosuje się ochładzalniki.

## Wykonanie badań

### Materiały do badań

Do badań zaproponowano dwa rodzaje mas, różniących się w sposób zasadniczy składem chemicznym, a tym samym właściwościami.

Masa modelowa oznaczona symbolem *IOd-A* to tworzywo stosowane do wykonywania modeli wykorzystywanych w produkcji wysokiej jakości odlewów precyzyjnych, zawierające w swoim składzie nanomateriał organiczny w ilości 25–30%.

Masa modelowa oznaczona symbolem *L-2* to nowo opracowana masa modelowa stosowana w produkcji typowych precyzyjnych odlewów maszynowych i handlowych. Właściwości powyższych rodzajów mas przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Właściwości badanych mas modelowych

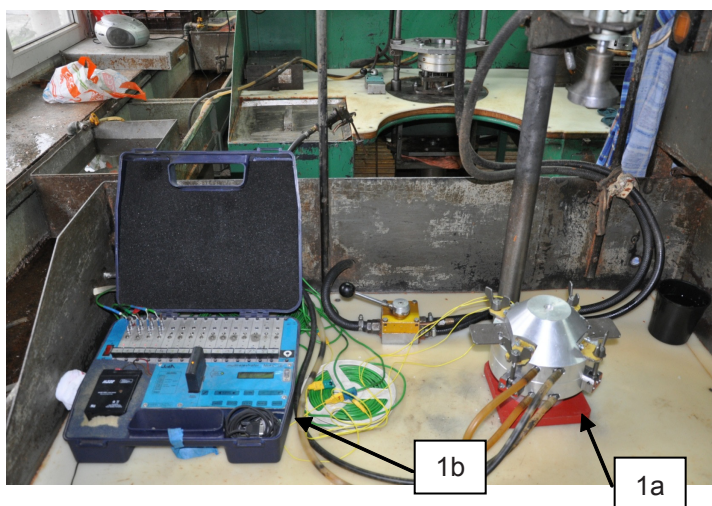
Table 1. Properties of the examined pattern materials

Właściwości mas modelowych		Masa modelowa <i>IOd-A</i>	Masa modelowa <i>L-2</i>
Fizykochemiczne	Temp. krzepnięcia, °C	74,0	68,2
	Temp. kroplenia, °C	80,0	69,0
	Temp. łamliwości wg Frassa, °C	27,0	20,0
	Penetracja, jedn. pen.	9	4
	Zawartość popiołu, %	0,002	0,031
Reologiczne	Lepkość kinematyczna w 100°C, mm <sup>2</sup> /s	547,30	6,63
	Lepkość dynamiczna w 60°C, Pa·s	11,22	nie oznaczano
Technologiczne	Skurcz liniowy, %	0,56	1,12
	Odształcalność w temp. 20°C, mm	0,22	0,22
	Odształcalność w temp. 30°C, mm	1,02	1,51
	Wytrzymałość na zginanie, MPa	0,82	0,46

## Przeprowadzenie badań

Badania krzepnięcia i stygnięcia mas modelowych w matrycy prowadzono w warunkach standardowego procesu wykonywania modeli. Do tego celu wykorzystano urządzenie, które spełniło następujące warunki:

- przebieg prasowania krzepnięcia i stygnięcia masy modelowej był analogiczny jak w procesie technologicznym wykonywania modeli,
- krzepnięcie i stygnięcie modelu było kontrolowane do momentu osiągnięcia temperatury otoczenia,
- pomiary temperatury były prowadzone z dokładnością  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  dla uchwycenia wszelkich zmian w wąskim przedziale temperatury.



Rys. 1. Stanowisko do badań mas modelowych

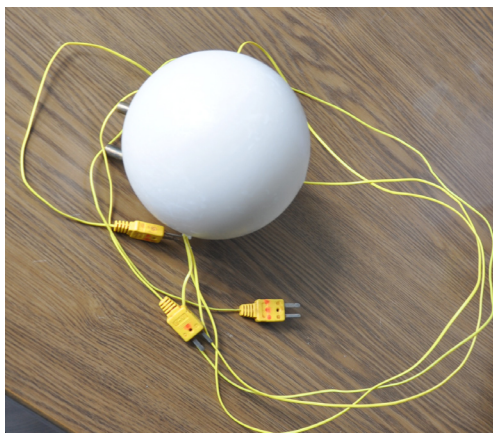
Fig. 1. A stand to test pattern materials

Stanowisko do badań (rys. 1) składa się z:

- matrycy metalowej wykonanej ze stopu Al (rys. 1a), w której odtwarzana jest wnęka w kształcie kuli o średnicy 120 mm, wyposażonej w:
  - układ wlewowy umożliwiający zaprasowanie masy modelowej w matrycy,
  - układ chłodzenia wodnego (kanały chłodzące),
  - system montażu elementów pomiarowych,
  - system zamykania matrycy;
- układu pomiarowego, na który składa się:
  - zestaw czterech termopar typ T umożliwiających pomiar temperatury:
    - w środku wnęki – kuli matrycy,
    - w odległości 0,5 promienia kuli, 30 mm od ścianki matrycy,
    - na ścianie wewnętrznej matrycy,
    - na zewnętrznej ścianie matrycy;

- rejestratora wielokanałowego Typ *MrAC-15* (rys. 1b), pozwalającego na jednoczesną rejestrację wyników badań temperatury z 4 kanałów pomiarowych. Rejestrator jest urządzeniem samodzielnym i w czasie rejestracji nie wymaga połączenia z komputerem. Dołączone oprogramowanie umożliwia odczyt i transmisję pomiarów do komputera PC, gdzie są one wizualizowane. Można też przeprowadzić transmisję wyników do programu Excel w celu ich dalszej obróbki matematycznej.

Masę modelową wprowadzano do matrycy w temperaturach pozwalających na dokładne odwzorowanie modelu kuli (rys. 2).



Rys. 2. Kula z masy modelowej L-2 po wyjęciu z matrycy

Fig. 2. A ball of L-2 pattern material after removal from the die

W momencie wprowadzenia masy uruchamiano rejestrator i obserwowano zmiany temperatury w trzech punktach modelu oraz temperaturę matrycy. Pomiar prowadzono do osiągnięcia temperatury otoczenia na granicy model–matryca (pomiar termoparą zainstalowaną na ścianie wewnętrznej matrycy).

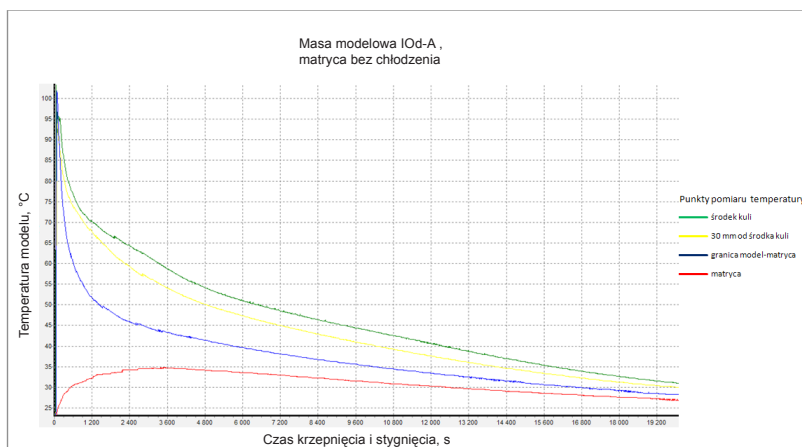
### Interpretacja wyników

Wyniki badań przedstawiono w tabelach 2 i 3 oraz na rysunkach 3–6.

Tabela 2. Temperatura modelu kuli wykonany z masy modelowej IOd-A – czas krzepnięcia i stygnięcia [s]

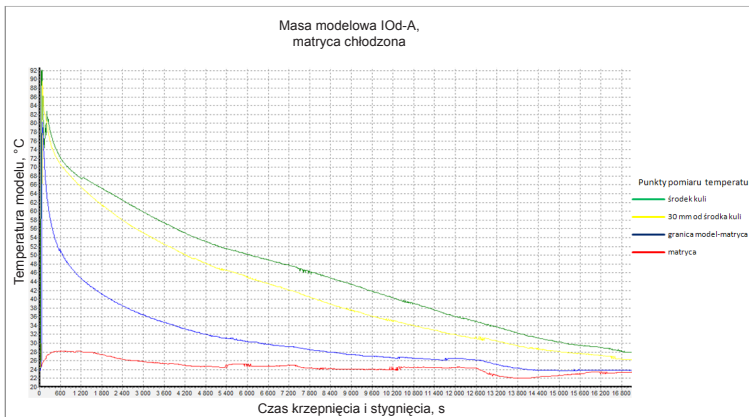
Table 2. Temperature of a ball model made from the IOd-A pattern material [°C] - cooling and solidification time [s]

Czas krzepnięcia i stygnięcia, s	Temperatura modelu, °C							
	Temperatura prasowania 85°C, matryca bez chłodzenia				Temperatura prasowania 85°C, matryca chłodzona			
	Miejsce pomiaru temperatury				Miejsce pomiaru temperatury			
	środek kuli	30 mm od środka kuli	granica model-matryca	matryca	środek kuli	30 mm od środka kuli	granica model-matryca	matryca
600	83	74	62	30	80	77	58	28
900	72	70	55	32	75	73	54	28
1200	70	68	51	33	68	65	44	28
2400	65	59	46	34	63	58	38	26
3600	58	54	43	35	57	52	35	25
6000	51	47	40	34	50	45	30	24
8400	47	43	40	33	45	39	28	24
10 800	45	39	35	31	39	34	26	22
13 200	38	36	35	30	34	30	28	22
15 600	35	33	31	28	30	28	24	22



Rys. 3. Wykres krzepnięcia i stygnięcia masy modelowej IOd-A, matryca bez chłodzenia

Fig. 3. Solidification and cooling curve for IOd-A pattern material without die cooling



Rys. 4. Wykres krzepnięcia i stygnięcia masy modelowej IOd-A, matryca chłodzona

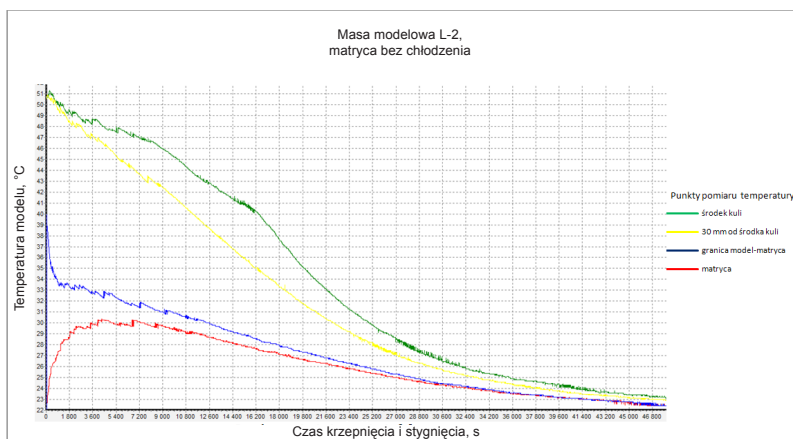
Fig. 4. Solidification and cooling curve for IOd-A pattern material with die cooling

Tabela 3. Temperatura modelu kuli wykonanego z masy modelowej L-2 – czas krzepnięcia i stygnięcia

Table 3. Temperature of a ball model made from the L-2 pattern material [°C] – cooling and solidification time [s]

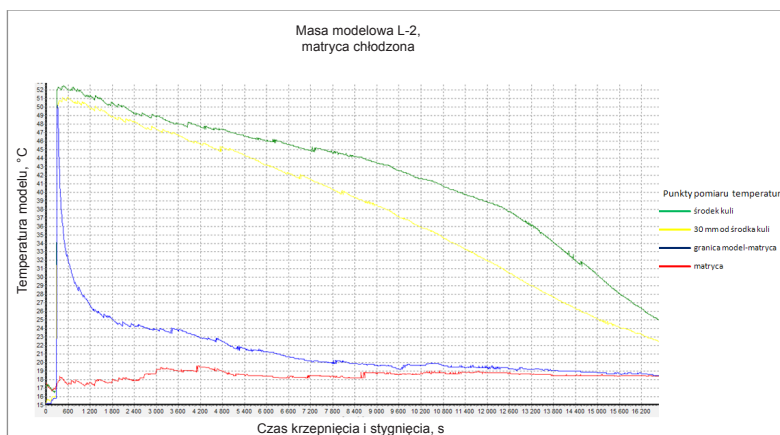
Czas krzepnięcia i stygnięcia, s	Temperatura modelu, °C							
	Temperatura prasowania 52°C, matryca bez chłodzenia				Temperatura prasowania 52°C, matryca chłodzona			
	Miejsce pomiaru temperatury				Miejsce pomiaru temperatury			
	środek kuli	30 mm od środka kuli	granica model-matryca	matryca	środek kuli	30 mm od środka kuli	granica model-matryca	matryca
600	51	50	33	27	52	51	32	18
1200	50	49	33	28	51	50	26	17
1800	49	48	33	29	49	48	25	18
2400	49	48	33	29	48	47	24	19
3600	48	47	33	30	48	43	22	18
6000	48	44	32	30	46	39	20	18
8400	47	43	31	30	44	35	20	19
10 800	44	41	30	30	41	35	20	19
12 600	43	39	30	29	38	30	19	19
15 600	41	36	29	28	28	24	18	17





Rys. 5. Wykres krzepnięcia i stygnięcia masy modelowej L-2, matryca bez chłodzenia

Fig. 5. Solidification and cooling curve for L-2 pattern material without die cooling



Rys. 6. Wykres krzepnięcia i stygnięcia masy modelowej L-2, matryca chłodzona

Fig. 6. Solidification and cooling curve for L-2 pattern material with die cooling

W tabeli 2 i 3 przedstawiono zmiany temperatury w czasie krzepnięcia i stygnięcia modelu wzorcowego (kuli) wykonanego z mas modelowych I0d-A i L-2 w dwóch warunkach technologicznych:

- w matrycy bez chłodzenia wodnego,
- w matrycy chłodzonej wodą.

Na rysunkach 3–6 opisano graficznie powyższe zmiany w układzie współrzędnych temperatura–czas. Analiza wyników wskazuje, że w początkowym okresie krzepnięcia nie występuje istotna różnica wartości temperatury w przestrzeni kuli, w odległości 30 mm od jej środka. W przypadku masy I0d-A ten stabilny okres trwa przez 1200 sekund, natomiast w przypadku masy L-2 wynosi on 2400 sekund – niezależnie od zastosowanego systemu chłodzenia. Wartość temperatury na granicy model-matryca



jest zdecydowanie niższa w porównaniu z obszarem centralnym (do 30 mm od środka) w początkowym okresie krzepnięcia; w dalszym etapie stygnięcia następuje jej kierunkowe wyrównanie.

### 3. Wnioski

1. Stwierdzono zdecydowany wpływ rodzaju stosowanej masy modelowej oraz przyjętego systemu chłodzenia matrycy na przebieg krzepnięcia i stygnięcia modelu.
2. Przedstawiona metodyka badań pozwala w warunkach produkcyjnych przeanalizować proces wykonywania modeli.
3. Szybkość krzepnięcia i stygnięcia modeli decyduje nie tylko o ich jakości, lecz również o wydajności urządzeń wtryskowych.
4. Należy dążyć do opracowania składu masy modelowej, charakteryzującej się dużą szybkością krzepnięcia i stygnięcia.

### Podziękowanie

Publikację opracowano na podstawie wyników realizacji projektu celowego nr 04569/C.ZR7-6/2010 pt. „Opracowanie i zastosowanie mas modelowych w aspekcie poprawy wydajności, jakości i ekologii procesu wytwarzania odlewów precyzyjnych”.

### Literatura

1. Ford D.A.: Investment Casting – from Hindsight to Foresight. Foundry Trade Journal, December 2000, pp. 12–18.
2. Whitehouse Ch., Dahlin B.: Effects of Wax Viscosity and Shell Permeability on Shell Cracking. Incast 2009, Vol. 22, No 4, pp. 12–15.
3. Bonilla W., Masaord S.H., Iovenitti P.: An Investigation of Wax Patterns for Accuracy Improvement in Investment Cast Parts, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, September 2001, Vol. 18, pp. 348–356.
4. Piwonka T.S., Woodburg K.A., Wiest I.M.: Modeling Casting Dimension: Effect of Wax Rheology and Interfacial Heat Transfer. Materials and Design, August 2000, Vol. 21, No 4, pp. 761–768.
5. Sabau A.S., Viswanth S.: Temperature Measurements in Wax Patterns and Wax die Interfacial Heat Transfer Coefficients in Investment Casting. Transactions of the American Foundry Society, 2003, Vol. 111, pp. 463–472.
6. Abraham I., Tretner C.: Investment Casting Waxes – Supply Guarantee and Quality Management in Relation to Changes in the Global Market Conditions. EICF 27<sup>th</sup> International Conference, Krakow, Poland, 16-18 May 2010.
7. Hancock P.: Wax Testing... Now and the Future. Foundry Trade Journal International, January/February 2011, Vol. 185, No. 3681, pp. 10–11.

