



**Czesław Baron\*, Jan Szajnar**

*Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Odlewnictwa  
ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice, Poland*

*\* Corresponding author. E-mail: czeslaw.baron@polsl.pl*

Otrzymano (Received) 21.02.2008

## PROGRAM DO OBLICZANIA GRUBOŚCI POWIERZCHNIOWYCH WARSTW KOMPOZYTOWYCH NA ODLEWACH STALIWNYCH

Proces tworzenia się kompozytowych warstw powierzchniowych jest złożony i zależy od wielu czynników technologicznych i materiałowych. Stąd też nie można jednoznacznie określić, jaka będzie jej grubość w danym miejscu odlewu. Skłania to do poszukiwania grubości warstwy kompozytowej jako pewnej zmiennej losowej. W pracy przyjęto założenie, aby poszukiwaną zmienną losową modelować prostym procesem zgłoszeń. Zbudowano algorytm w oparciu o podany proces stochastyczny, który następnie został wykorzystany do budowy programu komputerowego Preforma 1.1, służącego do obliczania wartości grubości warstwy kompozytowej. Głównym celem niniejszej pracy było wykazanie skuteczności metody opartej na rachunku prawdopodobieństwa z uwzględnieniem wyników uzyskanych empirycznie. W celu udowodnienia skuteczności metody stochastycznej wyznaczania grubości kompozytu porównano realne grubości kompozytu uzyskanego na drodze doświadczenia z grubością kompozytu otrzymanego w oparciu o program symulacyjny NovaFlow&Solid i Preforma 1.1. Wyznaczone wartości grubości warstwy kompozytowej przy zastosowaniu autorskiego programu Preforma 1.1 okazały się porównywalne z wartościami otrzymanymi na stalowych odlewach doświadczalnych, co świadczy o poprawności metody. Należy podkreślić, iż zaletą metody jest jej prostota w użyciu. Metoda ta pozwala ominąć opis skomplikowanych zjawisk wynikających z procesów dyfuzyjnych, uzależniając wyznaczenie grubości warstwy kompozytowej tylko od temperatury zalewania i czasów ( $t_s$ ) przebywania preformy powyżej  $T_S$ .

**Słowa kluczowe:** staliwo, kompozyt, kompozytowa warstwa powierzchniowa, symulacja komputerowa

## PROGRAM FOR THE THICKNESS OF COMPOSITE SURFACE LAYER COUNTING

The production of cast with composite surface layer is not complicated for technological reasons. However, the process of forming these layers is complex and depends on many technological and material factors. Because of great amount of factors, which influence the thickness, it is possible to use the theory of probability to calculate the thickness of composite layer in particular part of the cast. The composite layer can be 1 mm thick or 2 mm thick and so on. So we can deal with the composite layer formation process as with the process of forming some partial layers. It is assumed that these layers appears in turn, of course - with a certain probability. It means, that the composite layer is formed by a random variable. Its thickness is a the expected value of this random variable. It is assumed, that the layers appears in turn and in this way form whole composite layer, so we can treat this process as a simply stochastic process of entries. The preform temperature (concretely the preform time of staying in the temperature between  $T_S - T_L$ ) was assumed as a basic factor which influences the thickness of composite layer. The algorithm (to determine the thickness of composite layer with the use of stochastic process) was worked out and used to build the program Preforma 1.1. The aim of researches was to prove the correctness of the method based on the calculus of probability thanks to the results of real casts. To prove the correctness of the stochastic method of determination the thickness of composite layer, the real thickness of composite formed during the real experiment were compared with the thickness of composite obtained from the simulation and program Preforma 1.1. In order to prove the correspondence between the preform times of staying in the temperature between  $T_S - T_L$  obtained from real experiment and simulation, the comparative analysis should be done in the same points of measurement. The goodness was obtained and allowed to use the results of simulation and real cast to build and check the mathematical model and computer program Preforma 1.1. The main conclusion is that the determined thickness of composite layer, with the use of program Preforma 1.1, are compatible with the thickness of composite layers measured during the experiment so this program is a useful tool to project the thickness of composite layers.

**Keywords:** cast steel, composite, casting composite, surfacing alloy layer, computer simulation

## WSTĘP

Wytwarzanie odlewów z kompozytową powierzchniową warstwą nie jest skomplikowane technologicznie. Jednak sam proces tworzenia się tych warstw jest złożony i zależy od wielu czynników technologicznych i materiałowych. Dotychczasowe wyniki badań pozwalają stwierdzić, że praktycznie dla każdego kształtu i wielkości odlewu należałoby dokonywać każdorazowo doboru parametrów procesu w celu określenia warunków technologicznych wytwarzania zapewniających otrzymanie powierzchniowej warstwy kompozytowej o odpowiedniej grubości. Badania prowadzone w Zakładzie Odlewnictwa Politechniki Śl. [1-9] pozwoliły na wyznaczenie podstawowych czynników technologicznych, takich jak: temperatura zalewania, kształt i moduł odlewu, konstrukcja układu zasilania, cechy geometryczne preformy, i następujących czynników materiałowych: rodzaj stopu i materiału preformy, zakres temperatury  $T_L$  i  $T_S$  (temperatury likwidus i solidus) stopu i materiału preformy.

Stąd przy takim wielorakim wpływie zmiennych czynników procesu na efekt końcowy, jakim ma być warstwa kompozytowa o żądanej grubości na wybranej powierzchni odlewu, możliwe jest wykorzystanie rachunku prawdopodobieństwa do jej obliczania.

Za podstawowy czynnik decydujący o grubości tworzącej się warstwy kompozytowej przyjęto temperaturę preformy, a w szczególności jej czas ( $t_s$ ) przebywania w temperaturze z zakresu  $T_S - T_L$  [3, 10].

Podczas badań przeprowadzono symulację komputerową procesu tworzenia się powierzchniowej warstwy kompozytowej oraz wykonano rzeczywiste odlewy w tych samych zadanych warunkach. Na podstawie uzyskanych wyników zbudowano algorytm obliczeń grubości warstwy kompozytowej z wykorzystaniem procesu stochastycznego. Algorytm został wykorzystany do budowy programu komputerowego Preforma 1.1, służącego do obliczania wartości grubości warstwy kompozytowej przy zadanym czasie ( $t_s$ ) przebywania preformy powyżej temperatury solidus ( $T_S$ ).

## CEL I ZAKRES BADAŃ

Celem badań było udowodnienie tezy, że „istnieje możliwość projektowania grubości warstwy kompozytowej na wybranej powierzchni odlewu przy zadanych warunkach procesu technologicznego w oparciu o proces stochastyczny, a podstawowym czynnikiem wpływającym na grubość powierzchniowej warstwy kompozytowej jest czas przebywania preformy w temperaturze powyżej  $T_S$  materiału preformy”. Zakres badań obejmował eksperyment na odlewach rzeczywistych i symulację procesu tworzenia się warstwy kompozytowej na odlewie stalowym.

Zostały wykonane następujące etapy badań:

- wybór kształtu odlewu stalowego do badań modelowych,
- przeprowadzenie badań na odlewach stalowych oraz pomiarów grubości powstałych na nich warstw kompozytowych [2, 3, 5, 6],
- rejestracja krzywych krzepnięcia i wyznaczenie czasów ( $t_s$ ) przebywania preformy powyżej temperatury  $T_S$ ,
- symulacja procesu tworzenia się warstw kompozytowych (NovaFlow&Solid) i określenie czasów ( $t_s$ ) przebywania preformy powyżej temperatury  $T_S$  [3, 9],
- opracowanie algorytmu obliczeń grubości warstw kompozytowych i jego aplikacja do programu Preforma 1.1,
- wyznaczenie grubości warstw kompozytowych w oparciu o wyniki symulacji programem NovaFlow&Solid i programem Preforma 1.1 oraz walidacja wyników.

## BADANIA NA ODLEWACH STALIWNYCH

W ramach badań wykonano serię odlewów próbnych w kształcie kul. Kule o średnicach 40, 60, 80, 100 mm zostały odlane w formach skorupowych wykonanych metodą Croninga. Preforma o grubości 5 mm została umieszczona na wewnętrznej części formy w kulach 60, 80, 100 mm, pokrywając 1/3 ich powierzchni.

Wartości wielkości charakterystycznych dla odlewów kul przedstawia tabela 1.

TABELA 1. Podstawowe wielkości odlewów kul  
TABLE 1. The characteristic values for ball casts

Średnica kuli $\phi$ , mm	100	80	60	40
Moduł kuli $M_K = d/6$ , cm	1,67	1,34	1	0,67
Średnica szyjki, mm	30	27	20	15
Obliczony czas krzepnięcia, min	5,86	3,77	2,10	0,94
Masa odlewu, kg	4,08	2,09	0,88	0,26

Osnowę preformy stanowił żelazochrom wysoko-węglowy o wielkości ziarna  $0,2 \div 0,4$  mm i składzie chemicznym podanym w tabeli 2. Jako spoiwa użyto 10% roztworu polistyrenu w octanie etylu  $C_4H_8O_2$ . Przyjęto następujące wartości temperatury solidus i likwidus dla materiału preformy:

$T_S$  - temperatura solidus dla FeCr - 1300°C,

$T_L$  - temperatura likwidus dla FeCr - 1545°C.

TABELA 2. Skład chemiczny FeCr użytego do badań  
TABLE 2. The chemical constitution of FeCr used for researches

FeCr	Fe	Cr	C	Al	Si
Zawartość, %	23,3	65,6	9,8	0,068	0,26

Odlewy próbne wykonano ze staliwa niskowęglowego, którego skład chemiczny podano w tabeli 3. Natomiast charakterystyczne temperatury wynoszą odpowiednio  $T_L$  - 1505°C,  $T_S$  - 1450°C.

TABELA 3. Skład chemiczny staliwa niskowęglowego  
TABLE 3. The chemical constitution of cast low - carbon steel

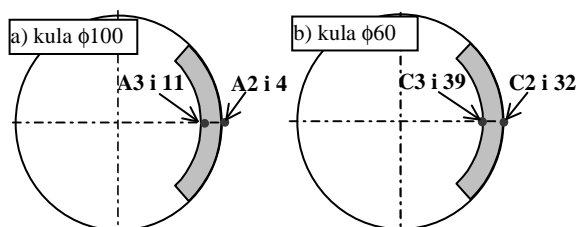
Zawartość, %	C	Mn	Si	P	S
Staliwo niskowęglowe	0,3+0,4	0,4+0,9	0,2+0,5	≤ 0,04	≤ 0,04

Temperatury metalu przed zalaniem formy wynosiły:

- temperatura przegrzania 1550, 1600, 1650°C,
- temperatura zalewania 1510, 1550, 1600°C.

W celu wyznaczenia krzywych krzepnięcia i stygnięcia odlewu oraz zmian temperatury w formie zamontowano termoelementy połączone z przetwornikiem analogowo-cyfrowym Crystaldigraph PC-T. Termopary wykonane były z drutu PtRh-Pt o średnicy 0,5 mm. W celu zwiększenia dokładności i zminimalizowania bezwładności układu pomiarowego termopary montowano wewnątrz formy bez dodatkowych osłon, jedynie pokryto je cienką warstwą Cyrkonalu.

Rysunek 1 przedstawia przykładowe położenie punktów pomiarowych dla kul  $\phi 100$  i  $\phi 60$  mm, natomiast na rysunkach 2-5 przedstawiono porównanie krzywych stygnięcia z symulacji i doświadczenia.



Rys. 1. Położenie termoelementów: A3, A2, C3, C2 - w odlewach rzeczywistych 11, 4, 39, 32 - w symulacji

Fig. 1. The position of measurement points A3, A2, C3, C2 - thermoelements in experiment 11, 4, 39, 32 - thermoelements in simulation

W wyniku pomiarów uzyskano krzywe krzepnięcia odlewów, dzięki którym można było określić charakterystyczne ciepłe warunki tworzenia się warstwy kompozytowej, w tym czasy ( $t_s$ ) przebywania preformy powyżej temperatury solidus ( $T_S$ ) dla poszczególnych kul (rys. rys. 2-5). Wyniki tych badań porównano z wynikami symulacji komputerowej tworzenia się warstwy kompozytowej.

## SYMULACJA KOMPUTEROWA

Projektując kształt odlewów do symulacji, korzystano z wyników wcześniejszych badań [1, 2], a następnie wykonano trójwymiarową geometrię odlewów wirtualnie w programie SolidWorks.

Geometrię tę zaimportowano do programu symulacyjnego NovaFlow&Solid. Dane termofizyczne podstawowych materiałów użytych w symulacji przedstawia tabela 4.

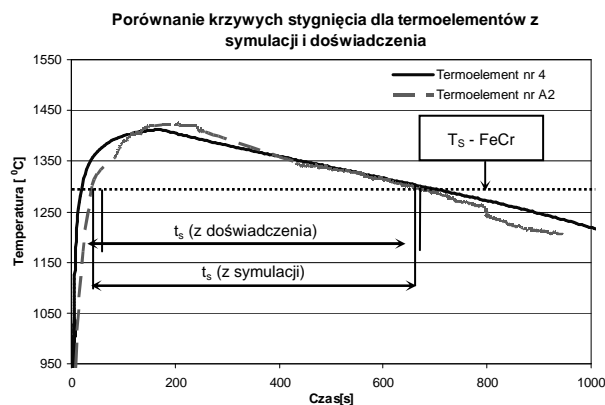
TABELA 4. Dane termofizyczne materiałów wykorzystanych w symulacji komputerowej

TABLE 4. The thermophysical data of basic materials used in simulation

$T$ , °C	$\lambda$ , W/m/°C	$C_p$ , J/kg/°C	$P$ , kg/m <sup>3</sup>
Żelazochrom FeCr			
0	45	450	-
500	30,6	550	7343
1100	24	650	7343
1200	24	650	7080
1500	24	750	7080
Staliwo GS240 wg PN-EN 10027-1:1994			
$T_L = 1505,53$ , $T_S = 1451$ $Q_{cr} = 250$ kJ/kg, $Q_{eut} = 250$ kJ/kg			
0	51,8	469	-
1400	51,8	469	7262,6
1525	51,8	469	6995
1550	51,8	740	6978,88
1600	30	740	6946,23
Masa formierska			
20	0,9	550	1550
500	0,6	600	1500
1000	0,5	800	1490
1500	0,5	900	1450

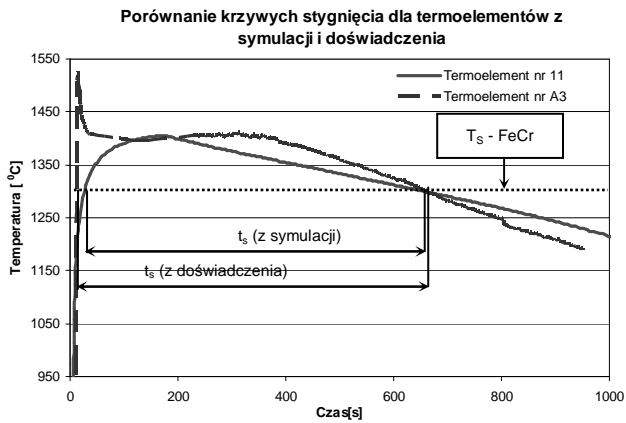
Materiał preformy został dołączony do grupy materiałów formierskich, co wynikało z ograniczeń programu symulacyjnego, natomiast sama preforma spełniała rolę ochładzalnika.

Na podstawie otrzymanych wyników symulacji wyznaczono - podobnie jak w badaniach na odlewach rzeczywistych (rys. 1) - wartości czasów ( $t_s$ ) przebywania preformy w danym punkcie pomiarowym, w temperaturze wyższej od temperatury solidus żelazochromu (rys. rys. 2-5).



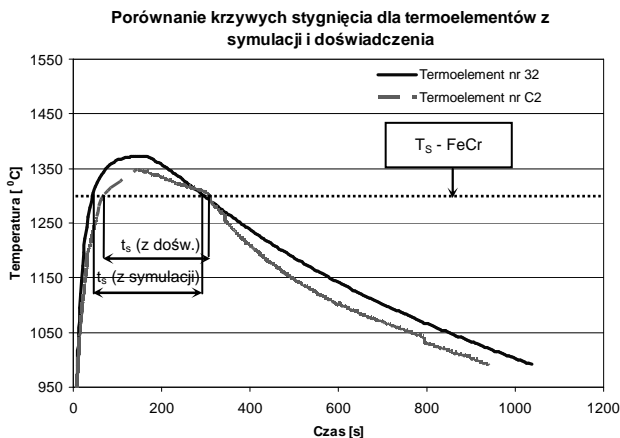
Rys. 2. Krzywe stygnięcia dla kuli  $\phi 100$  w punktach pomiarowych umieszczonych na zewnętrznej powierzchni preformy,  $T_{zal} = 1550^\circ\text{C}$

Fig. 2. Self - cooling curves for ball  $\phi 100$  in measurement points of the premould surface placed on the outer side (nr 4 and A2),  $T_{zal} = 1550^\circ\text{C}$



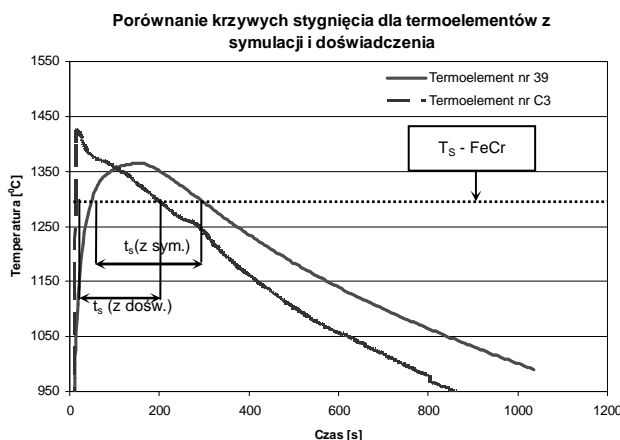
Rys. 3. Krzywe stygnięcia dla kuli  $\phi 100$  w punktach pomiarowych umieszczonych na wewnętrznej powierzchni preformy,  $T_{zal} = 1550^{\circ}\text{C}$

Fig. 3. Self - cooling curves for ball  $\phi 100$  in measurement points of the premould surface placed on the inner side (nr 11 and A3),  $T_{zal} = 1550^{\circ}\text{C}$



Rys. 4. Krzywe stygnięcia dla kuli  $\phi 60$  w punktach pomiarowych umieszczonych na zewnętrznej powierzchni preformy,  $T_{zal} = 1550^{\circ}\text{C}$

Fig. 4. Self - cooling curves for ball  $\phi 60$  in measurement points of the premould surface placed on the outer side (nr 32 and C2),  $T_{zal} = 1550^{\circ}\text{C}$



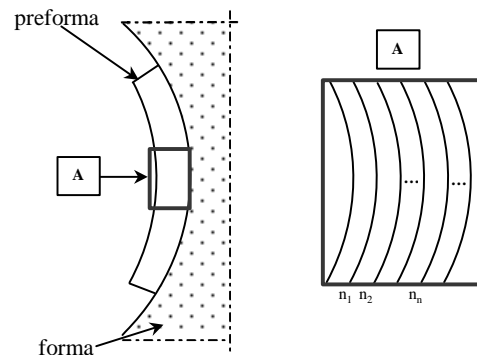
Rys. 5. Krzywe stygnięcia dla kuli  $\phi 60$  w punktach pomiarowych umieszczonych na wewnętrznej powierzchni preformy,  $T_{zal} = 1550^{\circ}\text{C}$

Fig. 5. Self - cooling curves for ball  $\phi 60$  in measurement points of the premould surface placed on the inner side (nr 30 and C3),  $T_{zal} = 1550^{\circ}\text{C}$

Analiza rysunków 2-5 pozwala stwierdzić, że czasy ( $t_s$ ) otrzymane z symulacji są zgodne z czasami uzyskanymi w doświadczeniach na odlewach rzeczywistych.

## ALGORYTM PROGRAMU PREFORMA 1.1

Ze względu na to, iż grubość powierzchniowej warstwy kompozytowej zależy od wielu czynników, a powstawanie warstwy jest procesem bardzo skomplikowanym nie można jednoznacznie określać, jaka będzie jej grubość w danym miejscu odlewu. Skłania to do poszukiwania grubości warstwy kompozytowej jako pewnej zmiennej losowej. Warstwa kompozytowa, jak widać po analizie wyników pomiarów, może przyjmować grubość 1 mm, 2 mm, ..., 5 mm. Zatem można potraktować proces jej tworzenia się jako powstawanie pewnych warstw cząstkowych jedno-, dwu-, itd. milimetrowych (rys. 6). Warstwy te powstają kolejno - najpierw pierwsza, po niej druga itd., oczywiście z pewnym prawdopodobieństwem. Oznacza to, że warstwę kompozytową tworzy zmienna losowa. Jej grubość jest wartością oczekiwaną tej zmiennej. Ponieważ warstwy częściowe pojawiają się „kolejno”, tworząc w końcu całą warstwę, można więc przyjąć, że warstwy częściowe „zgłaszają się”. Stąd pomysł, aby poszukiwaną zmienną losową modelować prostym procesem zgłoszeń. W pracy wykorzystano algorytm zbudowany w oparciu o podany proces stochastyczny.



Rys. 6. Układ forma-preforma z podziałem na warstwy

Fig. 6. The configuration mould-premould with the division into layers

Podstawowe kroki w celu wyznaczenia grubości warstwy kompozytu to:

- określenie kształtu odlewu,
- określenie temperatury zalewania,
- określenie czasu  $t_s$  w miejscu powstania warstwy kompozytowej.

Punktem wyjścia do przeprowadzenia obliczeń i wyznaczenia grubości warstwy kompozytowej jest uzyskanie czasów ( $t_s$ ), czyli czasu osiągnięcia i przebywania preformy powyżej temperatury solidus.

Przy założeniach technologicznych dla określonych czasów zalewania oraz kształtu odlewu można wykonać dowolny program symulacyjny, na przykład

NovaFlow&Solid, który oblicza w odpowiednio wybranych miejscach preformy czasu  $t_s$ .

Tok obliczeń obejmuje następujące etapy:

1. Uporządkowanie rosnąco otrzymanych z symulacji czasów wygrzania preformy.
2. Podział tak ustalonego ciągu czasów na przedziały i wyznaczenie średniej wartości czasów zawartych w danym przedziale. Ze względu na dużą rozpiętość czasów  $t_s$ , rozmieszcza się je w przedziałach 0÷150 s, 151÷250 s, 151÷250 s, ..., obliczając w każdym przedziale średnią  $t_{sr}$  czasów, które znalazły się w danym przedziale. Dzięki temu wartości  $t_s$  z danego przedziału są zbliżone do średniej tego przedziału. Gdyby nie podział na przedziały, średnia wszystkich czasów odbiegałaby zbyt dużo od skrajnych czasów, co wpłynęłoby negatywnie na wyniki obliczeń.
3. Wyznaczenie maksymalnej liczby warstw ( $n_0$ ), jakie mogą powstać dla każdego z przedziałów z odpowiedniej funkcji empirycznej. Dobór  $n_0$  polega na tym, aby ze wszystkich możliwych rozwiązań wybrać rozwiązanie odpowiadające powstaniu warstwy kompozytowej zgodnej z warstwą otrzymaną na drodze doświadczenia traktowaną jako warunek początkowy. W prezentowanym modelu grubość warstwy kompozytowej zależy od czasu  $t_s$  oraz od wielkości  $n_0$ . Zakłada się dalej, że funkcja, z której wyznacza się  $n_0$ , jest funkcją liniową, a  $n_0$  przyjmuje się, zaokrąglając wartość funkcji

$$y = At_s + B \quad (1)$$

do liczby naturalnej, ponieważ jest to liczba warstw częściowych. Obliczenie współczynników  $A$  i  $B$  przeprowadza się jednorazowo dla każdego kształtu odlewu i temperatury zalewania na podstawie wyników doświadczalnych. Następnie wprowadza się je do algorytmu i wyznacza się grubość warstwy kompozytowej dla każdego czasu  $t_s$  i danej temperatury zalewania  $T_{zal}$ .

4. Wyznaczenie współczynnika intensywności procesu ( $\lambda$ ) dla każdego z przedziałów. Wartości współczynnika intensywności procesu  $\lambda$  ustala się dla wartości średniej  $t_{sr}$  dla poszczególnych przedziałów

$$\lambda \in \left\{ \frac{1}{t_{sr}}, \frac{2}{t_{sr}}, \dots, \frac{n_0}{t_{sr}} \right\}$$

co oznacza największe prawdopodobieństwo powstania warstwy pierwszej w przypadku  $\lambda = \frac{1}{t_{sr}}$ ,

drugiej w przypadku  $\lambda = \frac{2}{t_{sr}}$ , ...,  $n_0$ -wej w przy-

padku  $\lambda = \frac{n_0}{t_{sr}}$ . Ze względu na to, iż nie ma żad-

nych przesłanek, która warstwa powstaje z największym prawdopodobieństwem, rozpatrujemy wszystkie możliwe wartości  $\lambda$ .

5. Obliczenie prawdopodobieństwa powstania  $n$ -tych warstw i wyznaczenie wartości oczekiwanej grubości kompozytu. Dla otrzymanych czasów obliczamy odpowiednie prawdopodobieństwa powstania  $n$  warstw ze wzoru

$$P_n(t) = \frac{\lambda^n t^n}{n!} e^{-\lambda t} \quad (2)$$

w którym przyjmuje się  $t = t_s$ ,  $\lambda = \frac{n}{t_{sr}}$ , gdzie

$n = 1, 2, \dots, n_0$ .

W wyniku otrzymuje się zmienną losową, której wartościami są odpowiednie numery kolejnych warstw z obliczonymi prawdopodobieństwami. Ponieważ brak jest jakichkolwiek przesłanek dotyczących decyzji, która warstwa powstaje z największym prawdopodobieństwem, obliczenia przeprowadza się dla wszystkich warstw o maksymalnym prawdopodobieństwie dla każdej kolejnej warstwy. Następnie oblicza się sumy prawdopodobieństw dla poszczególnych wartości współczynnika  $\lambda$ , a dla wartości większych od zadanej liczby 0,95 (poziom akceptacji) oblicza się wartości oczekiwane, których średnia jest szukaną grubością warstwy kompozytowej. Zamiast 0,95 powyżej można przyjąć inną wartość, np. 0,85 czy 0,75, zmniejsza to jednak dokładność obliczeń.

Zamieszczony poniżej przykład jest wynikiem obliczeń przeprowadzonych dla przykładowo zadanych wartości  $t_{sr}$ ,  $t_s$  i  $n_0$ .

Elementy tabeli 5  $P_{ki}$  zaznaczone kolorem szarym oznaczają prawdopodobieństwo wystąpienia  $i$ -tej warstwy dla  $\lambda = \frac{k}{t_{sr}}$ . Przykładowo wartość  $P_{32} = 0,21638$  jest prawdopodobieństwem wystąpienia drugiej warstwy dla  $\lambda = \frac{3}{401,8}$  liczonym zgodnie ze wzorem (2)

$$P_{32} = \frac{\left(\frac{3}{401,8}\right)^2 415,34^2}{2!} e^{-\frac{3}{401,8} 415,34}$$

6. Podanie zależności między czasem  $t_s$  wygrzania preformy a grubością warstwy kompozytowej. Ostatecznym wynikiem działania jest podanie zależności między czasem wygrzania preformy a grubością warstwy kompozytowej, otrzymanej jako prosta regresji między tymi zmiennymi

$$g_k = at_s + b \quad (3)$$

gdzie:

$g_k$  - grubość warstwy kompozytowej,

$t_s$  - czas wygrzania preformy powyżej temperatury solidus.

## Przykład

TABELA 5. Tablica prawdopodobieństw  $P_{ki}$  dla  $t_s = 415,34$ ;  $n_0 = 11$ ;  $t_{sr} = 401,8$   
 TABLE 5. Table of probabilities  $P_{ki}$  for  $t_s = 415.34$ ;  $n_0 = 11$ ;  $t_{sr} = 401.8$

$\lambda$	$t_s, s$	Numer warstwy $n$					$\sum_{i=1}^{n_0} P_{ki}$	Wartość oczekiwana EX
		1	2	...	11			
1/401,8	415,34	0,36768	0,19003	...	0,00000	0,64431		
2/401,8	415,34	0,26156	0,27037	...	0,00001	0,87348		
3/401,8	415,34	0,13955	0,21638	...	0,00029	0,95490	3,09990	
4/401,8	415,34	0,06618	0,13682	...	0,00242	0,98279	4,11979	
5/401,8	415,34	0,02942	0,07604	...	0,01003	0,98732	5,08054	
6/401,8	415,34	0,01256	0,03895	...	0,02650	0,97293	5,88251	
7/401,8	415,34	0,00521	0,01886	...	0,05137	0,93455		
8/401,8	415,34	0,00212	0,00876	...	0,07938	0,86738		
9/401,8	415,34	0,00085	0,00394	...	0,10315	0,77254		
10/401,8	415,34	0,00034	0,00173	...	0,11692	0,65784		
11/401,8	415,34	0,00013	0,00075	...	0,11865	0,53509		
Szukana średnia grubość warstwy kompozytowej							4,55 mm	

Przedstawiony algorytm został wykorzystany do budowy programu komputerowego Preforma 1.1, służącego do obliczania wartości grubości warstwy kompozytowej. Program został opracowany przy użyciu środowiska programistycznego Borland Delphi i pracuje pod kontrolą systemu operacyjnego MS Windows. Dane wejściowe stanowią zapisane w formacie „txt” czasy ( $t_s$ ) przebywania materiału preformy powyżej temperatury solidus ( $T_s$ ) przy danej temperaturze zalewania ( $T_{zal}$ ).

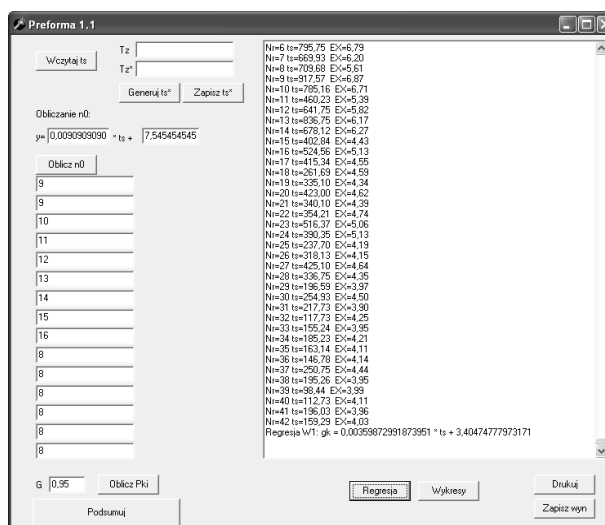
## OPIS PROGRAMU PREFORMA 1.1

Program został opracowany z użyciem środowiska programistycznego Borland Delphi i pracuje pod kontrolą systemu operacyjnego MS Windows. Dane wejściowe stanowią zapisane w formacie tekstowym czasy ( $t_s$ ) przy danej temperaturze zalewania ( $T_{zal}$ ), obliczone w wyniku symulacji procesu tworzenia się warstwy kompozytowej na odlewie profesjonalnym programem np. NovaFlow&Solid.

Po uruchomieniu programu należy kliknąć przycisk „Wczytaj  $t_s$ ” i zaznaczyć żądany plik danych wejściowych. Następnie należy podać współczynniki prostej empirycznej (A i B) szacującej maksymalną dopuszczaną liczbę warstw kompozytowych ( $n_0$ ) w zależności od czasu stygnięcia uzależnioną od kształtu odlewu i temperatury zalewania. Po przyciśnięciu przycisku „Oblicz  $n_0$ ” program grupuje podane czasy stygnięcia ( $t_s$ ) w 15 przedziałach, przyjmując maksymalną liczbę warstw kompozytowych dla każdej z nich w zależności od otrzymanego średniego czasu stygnięcia dla każdego z przedziałów. Następnie należy przyjąć poziom akceptacji G (z przedziału od 0 do 1). Po naciśnięciu przyci-

sku „Oblicz  $P_{ki}$ ” program obliczy zgodnie z algorytmem prawdopodobieństwa powstawania różnych grubości warstw kompozytowych dla każdego z podanych czasów. Po naciśnięciu „Podsumuj” w okienku po prawej stronie widoczne są dane wyjściowe będące czasami stygnięcia ( $t_s$ ) wraz z oczekiwaną grubością kompozytu (EX) w miejscu pomiaru. Przycisk „Regresja” umożliwia podanie wzoru prostej regresji uzależniającej grubość kompozytu od czasu stygnięcia  $t_s$  dla zadanych warunków. Po naciśnięciu przycisku „Wykresy” otrzymuje się graficzną ilustrację prostej regresji. Dane wyjściowe mogą zostać zapisane w formacie „txt” po naciśnięciu przycisku „Zapisz wyn” i wydrukowane po naciśnięciu przycisku „Drukuj”.

Na rysunku 7 pokazano przykładowy panel programu Preforma 1.1.



Rys. 7. Przykładowy panel programu Preforma

Fig. 7. An example of Preforma 1.1 panel

W zaprezentowanym przykładowym panelu liczba 0,0909090909 to współczynnik  $A$ , a liczba 7,5454545454 to współczynnik  $B$  prostej (1). Wartość 0,95 to przyjęty poziom akceptacji. Liczby w okienkach po lewej stronie oznaczają maksymalne liczby warstw dla czasów  $t_s$  należących do kolejnych przedziałów. Przykładowo liczba  $n_0 = 12$  oznacza maksymalną liczbę warstw, które mogą powstać dla czasów przebywania materiału preformy powyżej temperatury solidus należących do 5 przedziału (przedziału zawierającego czasy  $t_s \in \langle 451, 550 \rangle$ ). Po prawej stronie w okienku widoczne są wyniki obliczeń (czasy  $t_s$  z obliczonymi grubościami powierzchniowych warstw kompozytowych, analogicznie tak jak w tabeli 5, na przykład nr 30 wskazuje, iż dla czasu  $t_s = 254,93$  grubość powierzchniowej warstwy kompozytowej wynosi 4,5 mm). Na samym dole okienka podany jest wzór W1 prostej regresji (3).

## ANALIZA PORÓWNAWCZA GRUBOŚCI WARSTW KOMPOZYTOWYCH

Przeprowadzone obliczenia grubości powierzchniowej warstwy kompozytowej programem Preforma i uzyskane wyniki pomiarów tej wielkości na odlewach stalowych potwierdzają poprawność stochastycznej metody wyznaczania grubości kompozytu. Zestawienie wyników zawarto w tabeli 6.

Porównano średnie grubości warstw kompozytowych na odlewy kul wykonanych ze staliwa o temperaturze zalewania  $1550^\circ\text{C}$  i grubość preformy 5 mm.

TABELA 6. Średnie grubości powierzchniowych warstw kompozytowych dla odlewów kul  
TABLE 6. The average thickness of surface composite layers for ball casts

Średnica kuli mm	Temperatura zalewania $1550^\circ\text{C}$		
	Średnie grubości warstwy kompozytu dla odlewów doświadczalnych mm	Średnie grubości warstwy kompozytu obliczone programem Preforma 1.1 mm	Błąd względny %
100	8,1	7,8	3,7
80	6,0	6,4	6,6
60	4,6	4,8	4,3

Jak widać, uzyskane wyniki są porównywalne i obarczone niewielkim błędem oraz dowodzą poprawności obliczeń grubości warstwy z użyciem programu Preforma 1.1.

## WNIOSKI I SPOSTRZEŻENIA

1. Uzyskane grubości warstw kompozytowych na odlewach rzeczywistych są zbliżone do grubości warstw obliczonych poprzez program Preforma 1.1, co świadczy o poprawności zastosowanej metody obliczeń.
2. Zaletą metody jest jej prostota w użyciu, mimo że procesy stochastyczne są dosyć złożoną dziedziną nauki. Metoda ta pozwala ominąć opis skomplikowanych zjawisk wynikających z procesów dyfuzyjnych, uzależniając wyznaczanie grubości warstwy kompozytowej tylko od temperatury zalewania i czasów ( $t_s$ ) przebywania preformy w temperaturze powyżej temperatury solidus materiału preformy.
3. Badania wykazały, że wartości czasu ( $t_s$ ) oraz temperatury zalewania są wystarczające do określenia grubości warstw kompozytowych w oparciu o proces stochastyczny.

## LITERATURA

- [1] Gawroński J., Szajnar J., Cholewa M., Wróbel P., Nowa technologia uszlachetniania odlewów do pracy w trudnych warunkach mechanicznych, Projekt badawczy KBN nr 3 P407 012 07, Politechnika Śl., 1997.
- [2] Wróbel P., Uszlachetnianie powierzchni odlewów stalowych kompozytową warstwą stopową w procesie odlewania, Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2004.
- [3] Baron C., Powierzchniowe warstwy kompozytowe na odlewach stalowych, Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2007.
- [4] Gawroński J., Szajnar J., Cholewa M., Wróbel P., Solidification and crystallization of the particles containing and surface composites, Proc. Materials Mechanical and Manufacturing Engineering, Gliwice 2005, 511-530.
- [5] Gawroński J., Ignaszak Z., Wróbel P., Composite alloy layer C-Cr-Mn on cast steel casting, Solidif. of Metals and Alloys 2000, 2, 44, 373-380.
- [6] Szajnar J., Cholewa M., Wróbel P., Study on theoretical bases of receiving composite alloy layers on surface of cast steel castings, Journal of Mater. Processing Technology 2004, 157-158, 20 Dec., 679-682.
- [7] Baron C., Gawroński J., The examination of the dependence between the thickness of surface composite layer and the size of the casting and the kind of composite pad, Archives of Foundry 2005, 5, 15, 15-24.
- [8] Baron C., Gawroński J., Stochastic method of thickness of composite layers on casting determination, Proc. AMME, Polska-Zakopane 2003, 51-56.
- [9] Baron C., Bartocha D., Gawroński J., Thermal simulation of formation composite layer on model casting process, Inter. Journal of Comput. Materials Science and Surface Eng. 2007, 1, 2, 163-180.
- [10] Baron C., Bartocha D., Szajnar J., The determination of the thickness of composite layer for ball casting, Archives of Materials Science and Engineering 2007, 28, Issue 7, July 2007, 425-428.