

## ASSESSMENT OF ANALYTICAL METHODS OF SOLIDIFICATION PROCESS AND INGOT FEEDHEAD SIZE DETERMINATION

STARCZEWSKI Jerzy, BIAŁOWĄS Wiesław  
Wydział Metalurgii i Inżynierii Materiałowej, Akademia Górniczo-Hutnicza  
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30, POLAND

### STRESZCZENIE

W opracowaniu dokonano krytycznego przeglądu metod analitycznych stosowanych przy obliczaniu czasów krzepnięcia i wielkości nadlewów dużych wlewków kuziennych. Wyniki obliczeń zostały zweryfikowane w warunkach przemysłowych i pozwoliły na dobór optymalnych parametrów geometrycznych nadlewu, a także na ocenę wpływ stosowanych materiałów nadstawkowych.

Istnieje szereg teorii pozwalających określić czas krzepnięcia odlewu i wlewka różniących się przyjmowanymi warunkami początkowymi są to :

- teoria N. Chworinowa [1] : autor proponuje włączenie ciepła przegrzania do ciepła krzepnięcia.
- rozwiązanie G.P. Iwancova [2], w którym wiąże się czas krzepnięcia z grubością warstwy zakrzepłej przy określonych założeniach upraszczających.
- rozwiązanie A.J. Wiejnika [3] zakładające, że odlew stygnie z dowolną intensywnością przy ustalonych warunkach brzegowych III rodzaju, zaś pole temperatury zakrzepłej warstwy opisuje parabola n-tego stopnia o wykładniku potęgowym  $n_1$ .
- rozwiązanie W. Longi [4], które ujmuje proces krzepnięcia odlewów i wlewków o różnych kształtach w tym również walca za który można uważać wlewek kuzienny dwunastokątny. Podane w rozwiązaniu zależności dotyczą wlewka krzepnącego we wlewnicy przy zmiennych warunkach brzegowych I rodzaju tzn. przy założonym rozkładzie temperatur na powierzchni wlewka.
- Z analizy przedstawionych metod wynika, że najpełniej przebieg rzeczywistych zjawisk zachodzących podczas krzepnięcia wlewka oddaje metoda W. Longi.

W zakresie metod obliczania wielkości nadlewów wlewków na uwagę zasługują trzy rozwiązania :

- W.A. Jefimowa [4], który proponuje uproszczoną metodę obliczania wymiarów cylindrycznej nadstawki. Metal w nadstawce traci ciepło przez powierzchnię boczną -  $q_{iz}$ , powierzchnię górną do otoczenia -  $q_{pr}$ , oraz dolną powierzchnię -  $q_{wl}$ .

- N. Chworinowa [5], który zakłada, że krzepnięcie metalu w nadlewie odbywa się na skutek narastania warstwy zakrzepłej od ścianki bocznej co opisuje wzór empiryczny :

$$\frac{V_{\xi}}{V_n} = K_n \frac{\sqrt{\tau}}{R_n} - 0,0028\Delta T_p$$

gdzie :

- $V_{\xi}$  - objętość metalu zakrzepłego w nadlewie,
- $V_n$  - objętość nadlewu
- $\tau_3$  - czas krzepnięcia wlewka,
- $R_n$  - sprowadzona grubość ścianki nadlewu
- $\Delta T_p$  - stopień przegrzania stali,
- $K_n$  - stała krzepnięcia metalu w nadlewie

$$K_n = 1,128 \frac{b_{iz} \cdot T_{sol}}{L_1 \cdot \rho_1}$$

gdzie:

- $b_{iz}$  - współczynnik akumulacji ciepła materiału izolacyjnego nadstawki,
- $L_1$  - ciepło krzepnięcia stali,
- $\rho_1$  - gęstość stali,
- $T_{sol}$  - temperatura solidusu stali

- rozwiązanie W. Longi [6], który w swojej metodzie uwzględnia szereg istotnych parametrów, a mianowicie :

- zasilanie ciekłą stalą korpusu wlewka odbywa się w sposób ciągły w okresie krzepnięcia,
- w nadlewie tworzy się jama skurczowa w wyniku przemieszczeń metalu spowodowanych zasilaniem pustek skurczowych we wlewie,
- w nadlewie istnieją warunki stygnięcia z małą intensywnością na skutek izolacji jego powierzchni bocznej i górnej,
- nadlew traci część ciepła do wlewka na drodze przewodzenia przez powierzchnię nadlew-wlewka.

W wyniku całkowania układu równań różniczkowych opisujących elementarne ilości ciepła traconego przez wlewka oraz ciepła krzepnięcia i akumulacji wlewka zapisanych przy wykorzystaniu parabolicznego rozkładu temperatury otrzymuje się następujące równanie bezwymiarowego czasu krzepnięcia całego wlewka.

$$Fo_3 = \frac{K_{Lp}}{n_1} \cdot \left( \frac{1}{2-n_p} - \frac{1}{3-n_p} \right) \cdot \frac{1}{n_1(n_1+1)} \cdot \left[ \frac{1+n_p}{2} - \frac{2+n_p}{3(2+n_1)} \right]$$

gdzie:

$$K_{Lp} = \frac{L_{1p}}{C_1 \cdot \Delta_1 T_{max}} \quad - \text{kryterium ciepła krzepnięcia,}$$

$L_{1p}$  - ciepło krzepnięcia stali powiększone o ciepło przegrzania,

$C_1$  - ciepło właściwe stali w stanie stałym,

$\Delta_1 T_{max}$  - spadek temperatury we wlewku dla momentu końca krzepnięcia,

$n_p$  - wykładnik paraboli opisujący pole temperatur powierzchni wlewka w czasie jego krzepnięcia,

$n_1$  - wykładnik paraboli opisującej rozkład temperatury w zakrzepłej warstwie wlewka.

Wielkość nadlewu według tej metody oblicza się uwzględniając wyznaczone laboratoryjnie własności termofizyczne materiałów nadstawkowych [6-8], oraz zakładając podział nadlewu na część ochraniającą i część zasilającą.

W metodzie tej przyjmuje się do obliczeń szereg założeń uwzględniających między innymi : ciągłe i kierunkowe zasilanie pustek skurczowych i związane z tym tworzenie się jamy skurczowej, wpływ oporów przepływu na wielkość części ochraniającej, straty ciepła do wlewka poprzez połączenie nadlew-wlewki przy założeniu, że nadlew powinien krzepnąć tak długo, jak długo trwa proces zasilania krzepnącego wlewka.

W oparciu o zaprogramowaną metodę obliczeń procesu krzepnięcia i zasilania wlewka o kształcie cylindrycznym, za jaki można uważać wlewki dwunastokątne opracowano algorytm i program obliczeniowy.

Do analizy przyjęto bazowy układ wlewki-wlewnica-nadstawka-materiały izolacyjne, odpowiadające rzeczywistym parametrom wymiarowym, technologicznym i termofizycznym materiałów nadstawkowych odlewania stali w gatunku 50HMV we wlewki o masie 50 Mg.

Obliczenia czasu krzepnięcia wykazały, że wlewki takie krzepnie w czasie  $\tau_3 = 11,2$  godz., który to czas można przyjąć za początek striperowania.

Przy ocenie wpływu na wielkość głowy wlewki jednego z badanych parametrów przyjmowano jako stałą wartość pozostałych. Jako wielkości bazowe w obliczeniach przyjęto :

- grubość pancerza nadstawki :  $X_2 = 0,13$  m.,
- temperaturę początkową nadstawki :  $T_{2p} = 250^\circ\text{C}$ ,
- grubość warstwy zasypki :  $X_z = 0,1$  m,
- współczynnik przewodzenia ciepła zasypki :  $\lambda_z = 0,5$  W/mK,
- pojemność cieplną (objętościowe ciepło właściwe) zasypki :  $Q_z = C_z \cdot \rho_z = 0,55$  MJ/m<sup>3</sup>K,
- współczynnik przewodzenia ciepła kształtki  $\lambda_{iz}$  : ASI - 1,1 W/mK, KA1 44 - 1,35 W/mK,
- pojemność cieplną kształtki :  $Q_{iz} = C_{iz} \cdot \rho_{iz}$  : ASI - 1,818 MJ/m<sup>3</sup>K, KA1 44 - 2,586 MJ/m<sup>3</sup>K.

Wyniki obliczeń opracowano w formie graficznej i przedstawiono na rysunkach od 1 do 3. Otrzymane rezultaty pozwoliły na ocenę wpływu początkowej temperatury nadstawki na wielkość nadlewu wlewka kuziennego o masie 50 Mg.

Jak widać z przedstawionych na rys. 1 wyników dla materiałów o wysokim współczynniku przewodzenia ciepła ( $\lambda_{iz}$ ) wzrost temperatury w zakresie 200-300°C powoduje obniżenie wysokości nadlewu ( $H_n$ ) rzędu 20%, zaś dla materiałów o  $\lambda_{iz}$  niższym, a więc o lepszych własnościach izolacyjnych obniżenie  $H_n$  wynosi około 10%.

Rys. 1. Wpływ początkowej temperatury nadstawki na wielkość wlewka nadlewu kuziennego o masie 50 Mg

Fig. 1. Influence of the thermal conductivity coefficient on the high feedhead ingot of 50 Mg with refractory materials As I or KA for different powder thickness.

Na rys. 2 przedstawiono wyniki obliczeń wpływu grubości kształtki ASI i jej współczynnika przewodzenia ciepła na wysokość nadlewu. Z przebiegu przedstawionych zależności widać pewien zakres minimalnych wielkości głowy wlewka odpowiadających określonym grubościom wyłożenia izolacyjnego nadstawki. Występowanie tego obszaru przesuwa się wraz ze wzrostem współczynnika  $\lambda_{iz}$  w kierunku większych grubości wyłożenia nadstawki. Jednocześnie widać, że dla materiałów o lepszych właściwościach izolacyjnych ( $\lambda_{iz}$  mniejsze) istnieje szerszy zakres optymalnej grubości wyłożenia izolacyjnego nadstawki, który odpowiada minimalnym wielkościom nadlewu.

Rys.2 Wpływ grubości kształtki ASI i jej współczynnika przewodzenia ciepła na wysokość nadlewu

Fig. 2. Influence of the refractory materials thickness on the high feedhead ingot for different heat conductivity coefficient ( $\lambda = 1.818 \text{ MJ/m}^3\text{K}$ ).

Rys.3. Wpływ grubości warstwy zasypki i jej współczynnika przewodzenia na wysokość nadlewu.

Fig. 3. Influence of the feedhead initial temperature on the high feedhead ingot of 50 Mg for different heat conductivity coefficient ( $\lambda = 2.586 \text{ MJ/m}^3\text{K}$ ).

Ocena wpływu grubości warstwy zasypki i jej współczynnika przewodzenia ciepła na wysokość nadlewu przedstawiono na rys.3.

Analiza tych danych wskazuje na wyraźny wpływ na wysokość nadlewu współczynnika przewodzenia ciepła zasypki  $\lambda_z$ , ze wzrostem którego rośnie  $H_n$ . Zależność ta jest bardziej istotna dla mniejszych grubości warstwy zasypki.

Wpływ ten jest bardziej znaczący dla zasypek o większym  $\lambda_z$  (gorsze właściwości izolacyjne).

## WNIOSKI

1. Obliczony czas krzepnięcia według metody W. Longi dla wlewka o masie 50 Mg wynosi 11,25 godz. i można go uznać za czas początku striperowania.
2. Na podstawie wyników obliczeń wpływu grubości wyłożenia izolacyjnego nadstawki można określić najmniejszą wysokość prawidłowo zasilającego nadlewu dającego maksymalny uzysk stali.
3. Analiza wpływu wartości  $\lambda_z$  i grubości warstwy stosowanej zasypki ( $X_z$ ) wskazuje na możliwość zmniejszenia wysokości nadlewu wlewka kuziennego 50 Mg przy stosowaniu zasypek o odpowiednich własnościach izolacyjnych i o określonej grubości ich warstwy. Zwiększenie grubości warstwy o 0,2 m powoduje zmniejszenie wysokości nadlewu rzędu 0,02 - 0,05 m.
4. Wyniki przeprowadzonej analizy wpływu własności materiałów izolacyjno-ciepłych na wielkość nadlewów wskazują na celowość dalszych poszukiwań nowych tworzyw o lepszych własnościach izolacyjnych, co pozwoliłoby na znaczne zwiększenie uzysku stali przeznaczonej na wlewki kuzienne.

## LITERATURA

- [1] Chworinow N.; Krystalizacja i nieodnorodność stali, Maszgizdat, Moskwa, 1958.
- [2] Iwancow G.P. ; Tęplotiechnika slitka. Metalurgizdat. Moskwa 1953.
- [3] Wiejnik A.I.; Teorija i rascot processa zatwardewanija otlivki w niemetaliceskoj forme. Trudy naucno-techniceskoj sessii. Technologija litiejnoej formy. Maszgizdat, Moskwa, 1954.
- [4] Longa W.; Opis matematyczny procesu krzepnięcia odlewów o kształcie klasycznym przy założonych warunkach brzegowych I-go rodzaju. PAN Oddział w Krakowie. Prace Komisji Metalurgiczno Odlewniczej. Metalurgia 23. 1975.
- [5] Jefimow W.A.; Stalnoj slitok. Metalurgizdat. Moskwa 1961.
- [6] Chworinow N.; Obliczanie nadlewów. 30 Międzynarodowy Kongres Odlewników. Praga 1963.
- [7] Longa W.; Nadlewy dla odlewów krzepnących w formach piaskowych i metalowych. Wydawnictwo „Słask”, 1976.
- [8] Starczewski J., Białowas W. ; Semidynamiczny model krzepnięcia stopów metali. Praca statutowa AGH, 1997.