ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1979

Seria: HUTNICTWO z. 18 Nr kol. 606

Tadeusz MAZANEK
Zdzisław KUDLIŃSKI

Instytut Metalurgii
Politechnika Śląska

ROLA MATERIAŁÓW NADSTAWKOWYCH W PROCESIE KRZEPNIĘCIA WLEWKÓW STALI USPOKOJONEJ

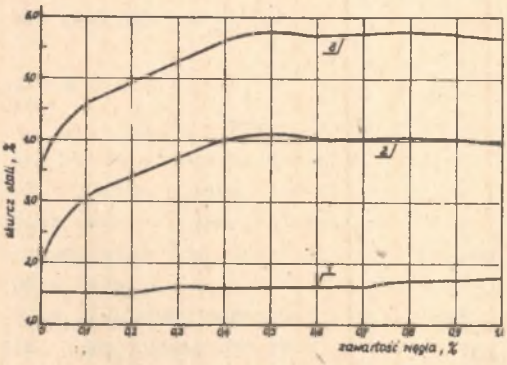
Streszczenie. Przeprowadzenie badań nad wpływem izolacji cieplnej nadlewu na proces krzepnięcia wlewków okrągłych oraz kształtowania się pierwotnej jamy skurczowej. Opracowano równanie obrazujące zarys jamy skurczowej w zależności od współczynnika wymiany ciepła pomiędzy nadlewem i korpusem w trakcie krzepnięcia wlewka.

1. WSTĘP

Odlewanie uspokojonych gatunków stali przeprowadza się do wlewnic zbieżnych ku dołowi lub do wlewnic zbieżnych ku górze. Ze względu na łatwiejsze rozbrajanie zestawow odlewniczych (wlewków) coraz częściej do odlewania stali uspokojonych stosuje się wlewnice zbieżne ku górze i wyposażone w ceramiczne płyty izolacyjne, noszące ogólną nazwę wkładek nadstawkowych. Wkładki te, ze względu na małą pracochłonność, przy zabudowie we wlewnicach i możliwość zakładania ich na dowolnej wysokości wlewnicy bardzo szybko przyjęły się w hutnictwie i obecnie są elementem nowoczesnej pracy stalowni.

2. TEORETYCZNE PODSTAWY TWORZENIA SIĘ PIERWOTNEJ JAMY SKURCZOWEJ

W wyniku ochładzania i krzepnięcia stali uspokojonej, odlanej do wlewnicy, zmniejsza się jej objętość. Przyczyną zmniejszania się objętości stali i liniowych wymiarów wlewka jest skurcz objętościowy stali a zwłaszcza skurcz w stanie ciekłym i w zakresie krzepnięcia, który decyduje o objętości powstałej pierwotnej jamy skurczowej we wlewku stalowym. Wielkość skurczu stali w stanie ciekłym i w zakresie krzepnięcia (rysunek 1, krzywa 3) kształtuje się w granicach od 4,0 do 5,75%, w zależności od składu chemicznego a szczególnie od zawartości węgla [1]. Natomiast stosowane w praktyce wielkości nadlewów wlewków stali uspokojonej w celu zlokalizowania pierwotnej jamy skurczowej są dwu- lub trzykrotnie większe od

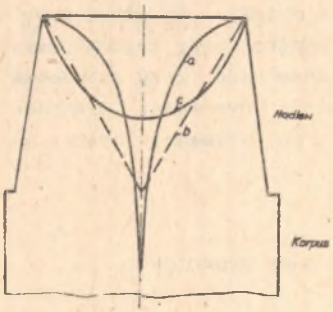


Rys. 1. Wpływ zawartości węgla na wielkość skurczu objętościowego stali

1 - skurcz w stanie ciekłym przy ochłodzeniu o 100°C, 2 - skurcz w zakresie krzepnięcia, 3 - sumaryczny skurcz w stanie ciekłym i w zakresie krzepnięcia

teoretycznej wielkości skurczu stali. O ile skurcz danego gatunku stali zależy od jej własności fizykochemicznych (składu chemicznego, zawartości gazów, temperatury przegrzania ponad temperaturę likwidusu, wielkości zakresu krzepnięcia itp.), to kształt i głębokość zalegania jamy skurczowej we wlewku jest uzależniony od kierunku i ilości przepływającego ciepła w nadlewie w czasie krzepnięcia wlewka. Z dotychczas przeprowadzonych badań nad stanem cieplnym nadlewów i pomiarów kierunku przepływu ciepła w nadlewie w czasie krzepnięcia wlewka [2 i 3] wynika, że przeważająca ilość ciepła nadlewu zużywana jest do nagrzania wyłożenia ogniotrwałego i korpusu nadstawki. Tylko nieznaczna jego ilość jest odprowadzana w kierunku osiowym:

- do otoczenia (z lustra metalu w nadlewie),
- do korpusu wlewka.



Rys. 2. Schemat zarysów pierwotnych jam skurczowych

Według Fentona i Strogonowa [2 i 3] na nagrzanie wyłożenia ceramicznego nadlewu zużywa się 80-84% całkowitej ilości ciepła nadlewu. Przez lustro metalu w nadlewie wypromieniowuje około 10% a do korpusu wlewka przepływa tylko 6-8% ciepła nadlewu. Odpływ dużej ilości ciepła z nadlewu w kierunku wyłożenia ogniotrwałego nadstawki powoduje, że metal w nadlewie krzepnie poziomo. Tworzy się głęboka pierwotna jama skurczowa, której kontury schematycznie przedstawia rysunek 2 i jak zaobserwowano w praktyce, przechodzi ona aż do korpusu wlewka. Jednym z najprostszych sposobów w zapobieganiu przed "przesuwaniem" się jamy do korpusu wlewka było zwiększanie objętości (masy) nadlewu. Wiąże się to z dużymi stratami stali, gdyż masa nadlewu decyduje o podstawowym wskaźniku efektywności pracy każdej stalowni, jakim jest uzysk stali z wlewka.

W dążeniu do zwiększania wskaźnika uzysku stali z wlewka, należy zmienić strukturę strat ciepła nadlewu podczas krzepnięcia wlewka poprzez

stosowanie lepszej izolacji cieplnej powierzchni bocznej nadlewu. Zwiększenie ilości odpływu ciepła z nadlewu do korpusu wlewka spowoduje wystąpienie pionowego frontu krzepnięcia w podnadlewowej części wlewka a utworzona pierwotna jama skurczowa będzie posiadała mniejszą głębokość (przy zachowaniu tej samej objętości) (rys. 2c). Zjawisko wymiany ciepła pomiędzy nadlewem i korpusem w czasie krzepnięcia wlewka określane jest w literaturze [4, 5, 6 i inni] nazwą pracy cieplnej nadlewu. Systematyczne zwiększanie pracy cieplnej nadlewów wlewków stalowych jest obecnie jednym z ważnych zadań w stalownictwie. Realizuje się to poprzez stosowanie izolacyjnych materiałów nadstawkowych (izotermicznych) i egzotermicznych do izolacji cieplnej powierzchni bocznych nadlewów oraz różnego rodzaju zasypek i lunkierytów do izolacji cieplnej lustra metalu w nadlewie. Powszechnie uważa się, że najefektywniejszym sposobem izolacji cieplnej głów wlewków stalowych o masie powyżej 5,0 ton jest [7 i 8]:

- wykładanie powierzchni bocznych nadlewu izotermicznymi materiałami nadstawkowymi,
- pokrywanie lustra metalu średnioegzotermicznymi lunkierytami o wartości cieplnej 8000 kJ/kg (ok. 1900 kcal/kg).

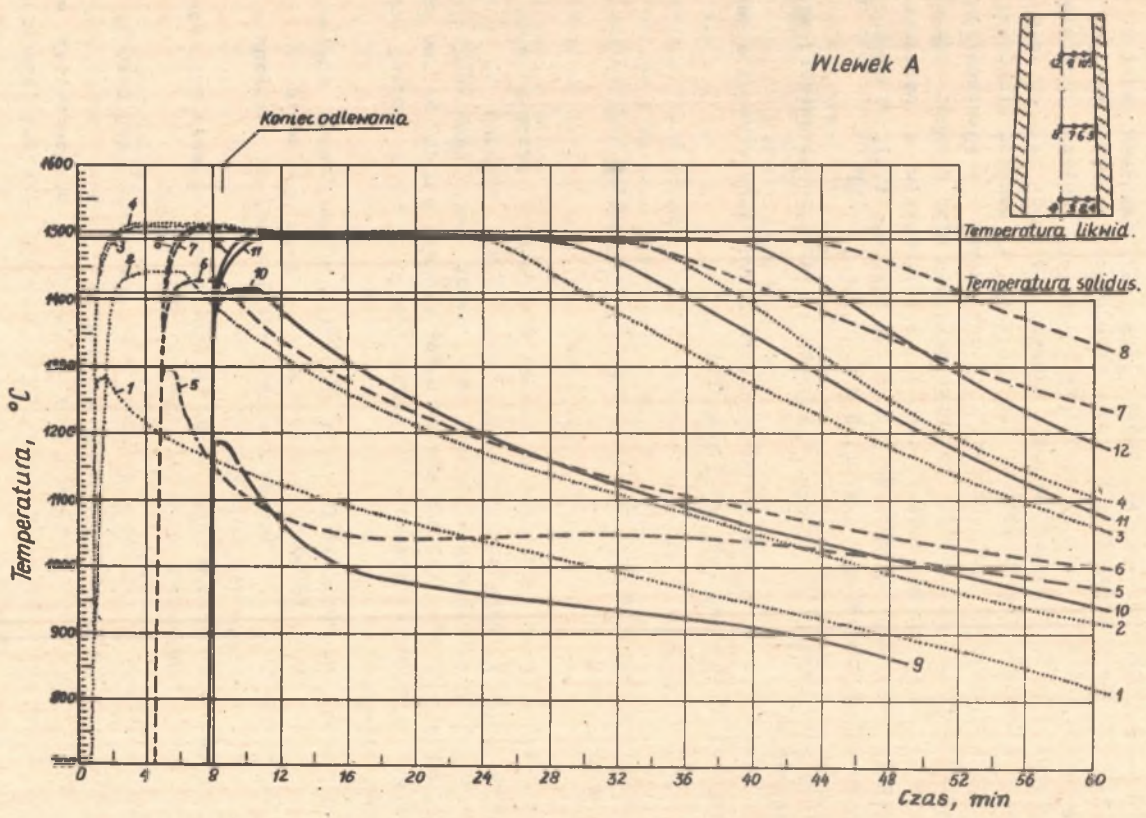
3. BADANIA WPŁYWU IZOLACJI CIEPLNEJ NADLEWU NA PRZEBIEG KRZEPNIĘCIA WLEWKÓW STALOWYCH

Do badań - przeprowadzonych w całości w warunkach przemysłowych - wytypowano wlewnice okrągłe typu Φ 450 o masie 2,5 t, zbieżne ku górze o smukłości 5,94 i zbieżności jednostronnej 0,65%. Stal konstrukcyjną zawierającą między innymi 0,60% węgla, 0,85% manganu i 0,25% krzemu odlewano metodą syfonową do trzech wlewnic posiadających różną boczną izolację cieplną nadlewu:

- wlewnica A - bez bocznej izolacji cieplnej nadlewu (metal nadlewu stykał się bezpośrednio z żeliwną ścianką wlewnicy),
- wlewnica B - posiadała boczną izolację cieplną nadlewu wykonaną z materiału szamotowego,
- wlewnica C - z bocznym ogrzewaniem nadlewu wlewka materiałem egzotermicznym o wartości cieplnej 8400 kJ/kg.

Proces odlewania wlewków doświadczalnych prowadzono pod zasypką pyłowo-grafitową ze średnią szybkością odlewania 270 mm/min. Pomiary szybkości krzepnięcia wlewków wykonano przy zastosowaniu bezpośredniej metody analizy termicznej, termoelementami typu Pt Rh-18, rozmieszczonymi na trzech poziomach wlewka:

- w głowie, 40 mm poniżej płaszczyzny podziału nadlew - korpus,
- w połowie wysokości korpusu wlewka,
- w stopie, 150 mm powyżej płyty podwlewnicowej.



Rys. 3. Rozkład temperatur we wlewku A podczas krzepnięcia

W każdym pomiarowym poziomie wlewka umieszczono po 4 termoelementy w różnych odległościach od powierzchni ścianki wlewnicy a temperaturę krzepnących wlewków rejestrował 12-punktowy elektroniczny kompensator typu UED-2. W ten sposób otrzymano trzy jednakowe wlewki stali uspokojonej różniące się stanem cieplnym nadlewu w czasie krzepnięcia. Pozwoli to na określenie wypływu izolacji cieplnej nadlewu (pracy cieplnej nadlewu) na przebieg procesu krzepnięcia wlewka i tworzenia się pierwotnej jamy skurczowej. W celu ujawnienia kształtu i głębokości zalegania pierwotnych jam skurczowych we wlewkach doświadczalnych, na wszystkich odciętych nadlewach wykonano przekroje osiowe i odbitki Baumanna.

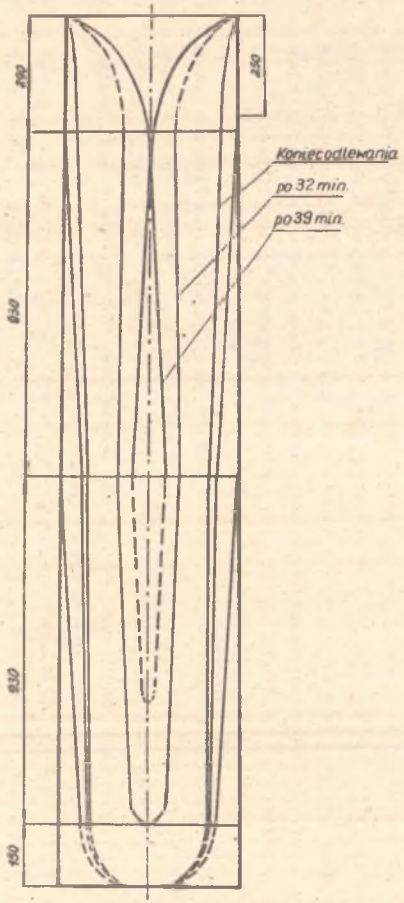
3.1. Wyniki badań

Z zarejestrowanych wykresów zmiany temperatury stali w czasie krzepnięcia wlewków wynika, że stal odlana do wlewnicy - mimo że jest stopem - krzepnie podobnie jak czysty metal, tzn. przy stałej temperaturze odpowiadającej temperaturze likwidusu. Brak przegięcia krzywych chłodzenia stali we wlewnicy w temperaturze solidusu - rys. 3, utrudnia jednoznaczne wyznaczenie zakresu krzepnięcia. Wobec braku doświadczalnych dowodów krzepnięcia stali w zakresie temperatur, analizę procesu krzepnięcia wlewków badawczych przeprowadzono w oparciu o przemieszczanie się w czasie punktu przegięcia krzywych chłodzenia na linii temperatury likwidusu, traktując go jako moment zakończenia krzepnięcia wlewka w danym punkcie pomiarowym. Przyrosty zakrzepłej warstwy wlewków w poszczególnych poziomach pomiarowych (głowa, korpus i stopa) przedstawiono na podłużnych osiowych przekrojach wlewków w postaci "izolikwidusów" - rys. 4, 5 i 6, obrazujących położenie granic frontu krzepnięcia w czasie - liczonym od początku odlewania.

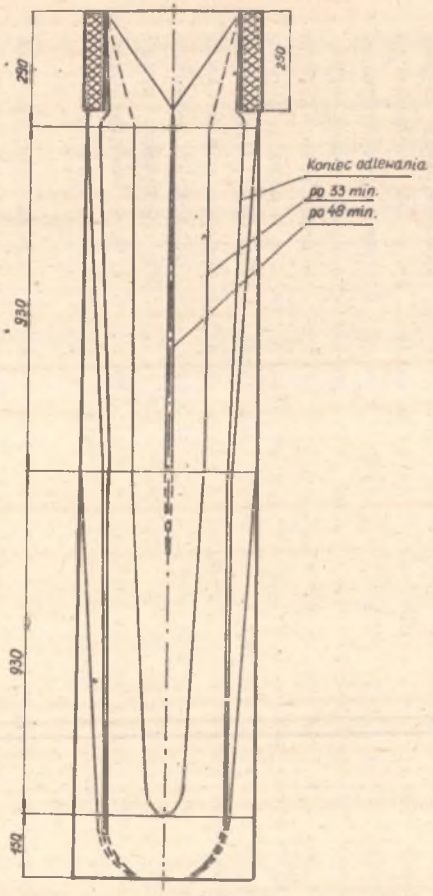
Prawie równoległy do ścianki wlewnicy układ linii frontu krzepnięcia dowodzi, że wlewki okrągłe charakteryzują się poziomym kierunkiem krzepnięcia. Taki sposób krzepnięcia jest niekorzystny z punktu kształtowania się struktury wlewka. Tworzy się głęboka pierwotna jama skurczowa oraz istnieją warunki do tworzenia się wtórnej jamy skurczowej (wlewek A). Czas krzepnięcia głowy wlewka A był o 5 min. krótszy od czasu krzepnięcia korpusu. Przy jednakowej wysokości zastosowanych nadlewów we wszystkich wlewkach badawczych wynoszącej 250 mm, wlewek A posiadał najdłuższą jamę skurczową równą 340 mm a jej zarys obrazuje rys. 7.

Przy zastosowaniu szamotu do bocznej izolacji cieplnej nadlewu wlewka B, nastąpiło wydłużenie czasu krzepnięcia nadlewu tak, że nadlew i korpus zakrzepły jednocześnie a ich czasy krzepnięcia wynosiły 46,5 min. Utworzona pierwotna jama skurczowa posiadała głębokość równą wysokości nadlewu, tj. 250 mm i kształt odwróconego stożka - rys. 8.

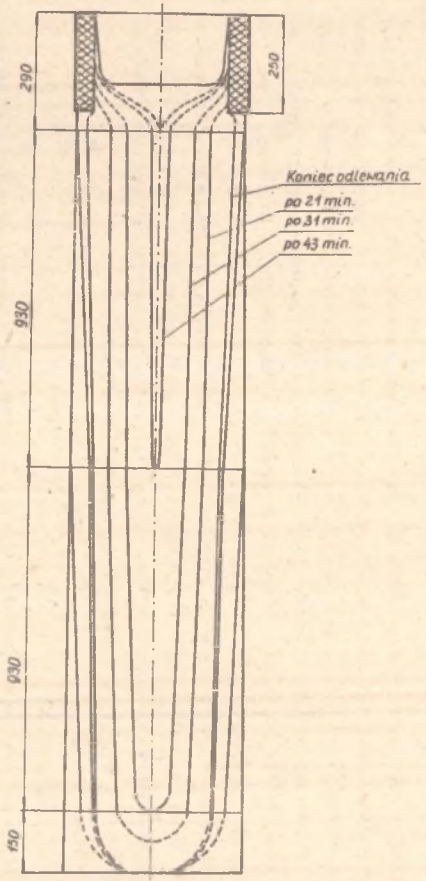
Ogrzewanie boczne nadlewu materiałem egzotermicznym, z którego wydzieliło się ok. 21000 kJ ciepła, w sposób zdecydowany zmieniło charakter krzepnięcia nadlewu wlewka C. Głowa wlewka C zakrzepła w ostatniej kolej-



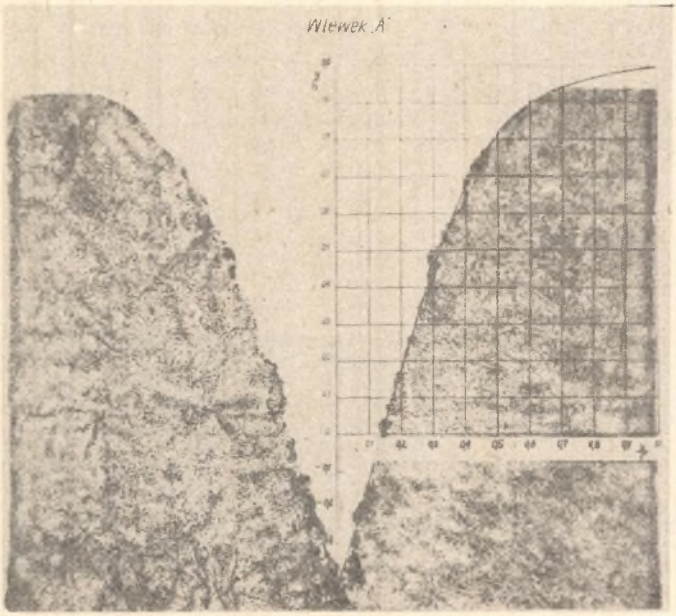
Rys. 4. Linie frontu krzepnięcia we wlewku A



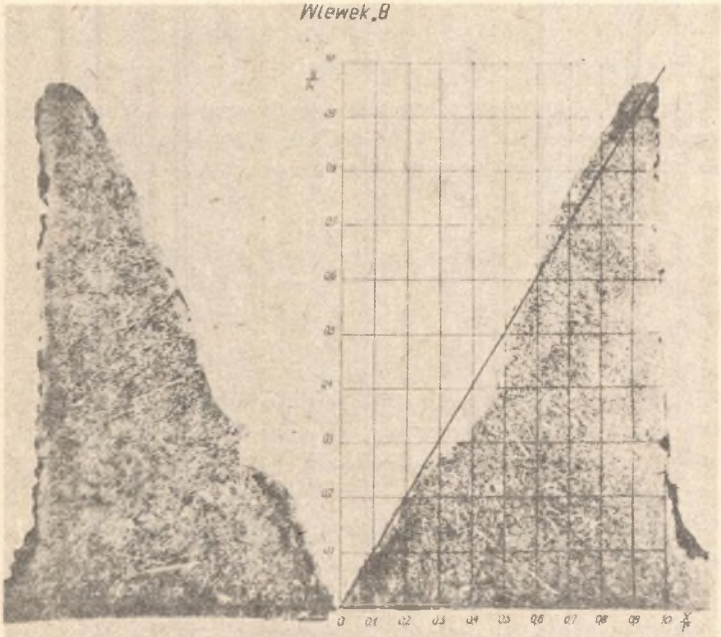
Rys. 5. Linie frontu krzepnięcia we wlewku B



Rys. 6. Linie frontu krzepnięcia we wlewku C



Rys. 7. Zarys pierwotnej jamy skurczowej we wlewku A



Rys. 8. Kształt pierwotnej jamy skurczowej we wlewku B

ności, tj. 2,5 min. po zakrzepnięciu korpusu. W ten sposób zostały stworzone warunki do zasilania korpusu wlewka ciekłą stalą z nadlewu przez cały okres krzepnięcia wlewka. Ze względu na kształtowanie się struktury pierwotnej wlewka zjawisko to jest bardzo pożądane: utworzona jama skurczowa posiada małą głębokość (tylko 181 mm) i wklęsły zarys - rys. 9, a różnica między wysokością nadlewu i długością jamy może stanowić dodatkowy uzysk stali z wlewka.

4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Z otrzymanych wyników badań wynika, logiczną zależność kształtu i głębokości zalegania pierwotnej jamy skurczowej od stopnia izolacji cieplnej nadlewu wlewka. Wraz ze wzrostem stopnia bocznej izolacji cieplnej nadlewu wzrasta ilość ciepła odprowadzona z nadlewu do korpusu wlewka a pierwotna jama skurczowa staje się krótsza i przybiera kształt czaszy (rys. 9). Wprowadzając współczynnik wymiany ciepła między nadlewem i korpusem podczas krzepnięcia wlewka η_k, określony jako stosunek ilości ciepła odprowadzonego z nadlewu do korpusu wlewka Q_k, do całkowitej ilości ciepła nadlewu Q_n, można otrzymać trzy graniczne przypadki jego wartości:

a) $\eta_k < 0$ - ciepło określone jako Q_k przepływa z korpusu do nadlewu, gdyż nadlew zakrzepł wcześniej niż korpus wlewka,

b) $\eta_k = 0$ - brak wymiany ciepła między nadlewem i korpusem: nadlew i korpus wlewka krzepną równocześnie,

c) $\eta_k > 0$ - ciepło Q_k przepływa z nadlewu do korpusu wlewka: nadlew zakrzepł w ostatniej kolejności.

Porównując krzywe zarysu pierwotnych jam skurczowych we wlewkach doświadczalnych (rys. 7, 8 i 9) z wartościami współczynnika η_k, wyprowadzono równanie kształtu pierwotnej jamy skurczowej w postaci:

$$\frac{y}{h} = \left(1 - \frac{1}{w}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{x}{r}\right)^n\right] \cdot \eta_k + \left(\frac{x}{r}\right)^n, \qquad (1)$$

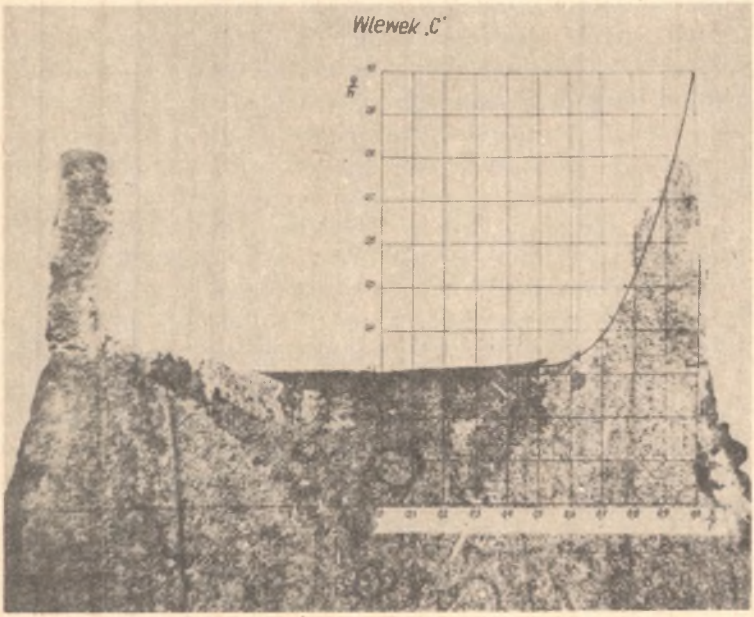
gdzie:

$n = \exp(s \cdot \eta_k)$,

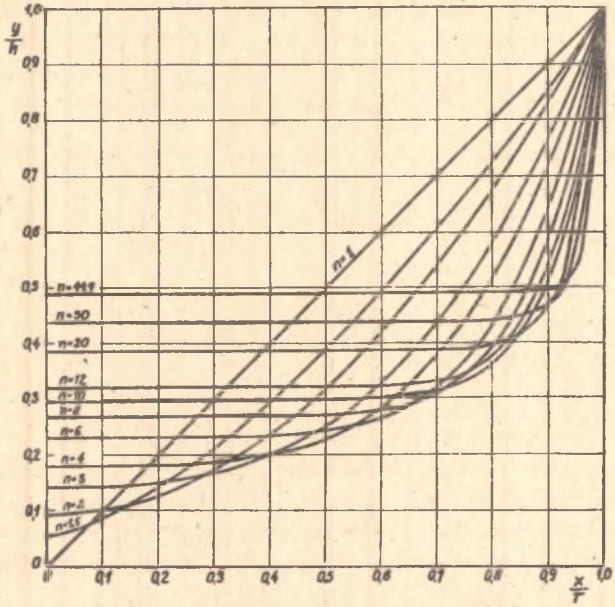
w zależności od parametrów konstrukcyjnych nadlewu (r-promień nadlewu, h - wysokość nadlewu), gatunku odlewanej stali i współczynnika wymiany ciepła między nadlewem i korpusem wlewka.

Graficzne rozwiązanie równania (1) obrazuje rys. 10 dla η_k zawartego w przedziale od 0 do 1 i pozostałych wartościach równania:

- stosunek rzeczywistej ilości stali w nadlewie do ilości stali określonej wielkością skurczu, w = 1,96,
- wielkość skurczu stali w zakresie krzepnięcia, s = 3,8%.



Rys. 9. Kształt pierwotnej jamy skurczowej we wlewku C



Rys. 10. Wykresy równania (1) obrazujące zarys pierwotnej jamy skurczowej przy $0 \leq \varphi_k \leq 1,0$

Uwzględniony w opracowanym równaniu współczynnik wymiany ciepła między nadlewem i korpusem charakteryzuje przebieg procesu krzepnięcia wlewka a zwłaszcza jego nadlewu. Liczbowa wartość η_k jest funkcją własności izolacyjnych materiałów nadstawkowych, tj. współczynnika przewodności cieplnej, pojemności cieplnej i gęstości.

5. PODSUMOWANIE

Decydujący wpływ na proces kształtowania się pierwotnej jamy skurczowej we wlewku stalowym posiada ciepło odprowadzone z nadlewu do korpusu w czasie krzepnięcia wlewka. Wraz ze wzrostem stopnia izolacji cieplnej nadlewu (żeliwo → szamot → materiał egzotermiczny) wzrasta praca cieplna nadlewu - rośnie współczynnik η_k. Utworzona jama skurczowa w warunkach dużego przepływu ciepła z nadlewu do korpusu, podczas krzepnięcia wlewka posiada małą gęstość i kształt czaszy. Jama skurczowa o kształcie czaszy sprzyja zwiększaniu uzysku stali z wlewka, a tym samym obniża ogólne koszty wytwarzania stali.

LITERATURA

[1] Matuschka B.: Berg u. Hüttenmännische Monatschefte. 1958, nr 1, s. 1.
[2] Fenton G.: Journal Iron Steel Institute. 1957, nr 8, s. 396.
[3] Strogonow A.J., Bogatienko W.F.: Stal, 1962, nr 1, s. 27.
[4] Kudliński Z.: Hutnik, 1973, nr 6, s. 287.
[5] Konowałow W.S.: Izw. Wysz. Ucz. Zaw. Czornoj Mietałłurgii, 1971, nr 2, s. 57.
[6] Jamar J.: La Fonderie Belge, 1973, nr 2, 3 i 4, ss. 28, 24 i 14.
[7] Böhm H.J.: Giesserei, 1971, heft 5, s. 118.
[8] Kudliński Z., Mazanek T.: Hutnik, 1978, nr 5, s. 202.

РОЛЬ НАДСТАВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ЗАТВЁРДЫВАНИЯ СЛИТКОВ СПОКОЙНОЙ СТАЛИ

Р е з ю м е

В статье приводятся исследования влияния термической изоляции литейной прибыли на процесс затвёрдывания круглых слитков, а также формирование исходной усадочной раковины. Разработанно тоже уравнение изобразающее контур усадочной раковины в зависимости от коэффициента теплообмена между литейной прибылю и корпусом во время затвёрдывания слитка.

THE ROLE OF HOT TOP MATERIALS IN THE PROCESS OF KILLED STEEL INGOT SOLIDIFICATION

S u m m a r y

The research on the influence of thermal insulation of the riser-head on the process of circular ingots solidification has been performed, as well as on the primary contraction cavity formation. The equation describing the outline of contraction cavity was acchieved, depending on the heat exchange coefficient pertinent to heat exchanged between the riser--head and the body.