

Józef GAWROŃSKI

Bernard KRAJCZY

Jan SZAJNAR

## SUSPENSYJNE ODLEWANIE STOPÓW ODPORNYCH NA ŻUŻYCIE

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono badania wpływu parametrów technologicznych w procesie odlewania suspensyjnego. Całość pracy obejmowała badania modelowe sprawdzające i zasadnicze. Celem badań modelowych było określenie parametrów odlewania. Badania sprawdzające wykonane na odlewach z żeliwa Zl Cr 26 umożliwiły ocenę skuteczności badań modelowych.

W zakresie badań zasadniczych wykonano odlew kształtowy dyszy pracującej w warunkach zużycia ściernego z żeliwa Zl Cr 26 technologią odlewania suspensyjnego.

Zarówno w badaniach sprawdzających jak i zasadniczych zastosowano dodatek dyspersyjny w postaci granulek z żeliwa Zl Cr 26.

Badania eksploatacyjne dysz wykazały czterokrotny wzrost trwałości odlewów suspensyjnych w porównaniu z odlewami tradycyjnymi.

## 1. Wstęp

Żeliwo wysokochromowe w czasie krzepnięcia posiada skłonności do tworzenia grubokrystalicznej struktury, jam skurczowych i rzadzisz, a po skrzepnięciu - skłonne jest do pęknięć i naderwań. Grubokrystaliczna struktura o budowie dendrytycznej obniża również własności eksploatacyjne tego tworzywa, a zwłaszcza odporność na zużycie ściernie i udarność. Masywne odlewy przeznaczone do pracy w warunkach erozji minimalnej i uderzeń dynamicznych zużywają się przedwcześnie, ponieważ współczesne możliwości technologiczne zmiany warunków krystalizacji tego tworzywa w formie odlewniczej są niewielkie i sprowadzają się do zmiany szybkości krzepnięcia grubościennych elementów odlewów.

Wprowadzenie do praktyki odlewniczej technologii suspensyjnego odlewania żeliwa wysokochromowego pozwoliłoby na radykalną zmianę warunków krystalizacji już w formie odlewniczej.

Jednym z najprostszycch wariantów technologii suspensyjnego odlewania stopów jest technologia suspensyjnego odlewania egzogenicznego [2], [3], [5], [7].

Zwiększenie ilości oraz aktywności ośrodków krystalizacji można osiągnąć przez celowe wprowadzenie drobnodispersyjnych dodatków suspensyjnych p d warunkiem spełnienia wymogów technologicznych procesu, takich jak masa dodatku, granulacja, temperatura przegrzania stopu oraz konstrukcja układu

wlewowego. Wielkość przechłodzenia stopu jako jeden z podstawowych parametrów krystalizacji ma podstawowe znaczenie, ponieważ przesuwa krytyczny promień zarodka w kierunku mniejszych wymiarów. Jeżeli przechłodzenie ulegnie zwiększeniu, następuje gwałtowne zmniejszenie bariery energetycznej, którą należy pokonać dla stworzenia zarodków o wymiarach krytycznych.

Prawdopodobieństwo tworzenia zarodków o wymiarach krytycznych wzrasta z kwadratem zwiększenia przechłodzenia zarówno przy heterogenicznej jak i homogenicznej krystalizacji. Szybkość zarodkowania fazy stałej zależy więc od wielkości przechłodzenia, ale jest również proporcjonalna do sumarycznych płaszczyzn endogenicznych i egzogenicznych ośrodków krystalizacji [1], [2]:

$$I = 10^{33} \frac{n_s}{n} \exp \left[ - \frac{16\pi \sigma^3 T_E V_S^2}{3 \Delta H^2 \Delta T^2 kT} \cdot f(\theta) \right]$$

gdzie:

- $n_s$  - ilość atomów na powierzchni podłoża zarodkowania przypadająca na jednostkę objętości ciekłego stopu  $V_s$ ,
- $n$  - ilość atomów w jednostce objętości ciekłego stopu,
- $\sigma$  - napięcie powierzchniowe na granicy faz,
- $T_E$  - temperatura równowagowa,
- $V_s$  - molowa objętość ciekłego stopu,
- $\Delta H$  - entalpia układu,
- $\Delta T$  - przechłodzenie ciekłego stopu,
- $T$  - temperatura bieżąca stopu,
- $k$  - współczynnik Boltzmana,
- $f(\theta)$  - funkcja zmiany skrajnego kąta zwilżania.

Analiza powyższego równania wskazuje również na fakt, że proces odlewania suspensyjnego, będąc źródłem dodatkowych obiektów stanowiących podłoże krystalizacji ( $n_s$ ) oraz zmieniając przechłodzenie ( $\Delta T$ ), pozwala osiągnąć w tych samych warunkach wymiany ciepła z formą odlewniczą - znacznie zwiększoną szybkość krystalizacji.

Cząsteczki dyspersyjnego dodatku suspensyjnego nie tylko same stanowią lub tworzą krystalizacji, ale równocześnie aktywizują ośrodki istniejące. Tworzenie nowych ośrodków polega przede wszystkim na cieplno-fizycznym oddziaływaniu na proces oraz modyfikującym działaniu na krystalizujący stop. Stąd dodatki suspensyjne podzielono na dodatki o działaniu ochładzającym, uszlachetniającym stopowo i modyfikującym. Tylko w przypadku czystych metali, do których wprowadzono mikroochładzalniki sporządzone z tych samych metali - obserwuje się klasyczne oddziaływanie cieplno-fizyczne na strefę przegrzania i przechłodzenia metalu. Wprowadzenie zaś do stopu dodatków suspensyjnych sporządzonych z tego stopu wykazuje już ich wielokierunkowe

działanie, a więc ochładzające, uszlachetniające stopowo, a przede wszystkim modyfikujące.

## 2. Cel i zakres badań

Badania podzielono na trzy grupy:

- badania modelowe,
- badania sprawdzające,
- badania zasadnicze.

Celem badań modelowych, opartych na fizycznym modelowaniu procesu odlewania suspensyjnego w przezroczystych modelach wykonanych ze szkła organicznego, było określenie pożądanych przekrojów elementów wlewowego oraz sposobu doprowadzenia cieczy modelowej do wnętrza formy o wymiarach  $200 \times 100 \times 50$  mm, sposobu płynięcia, mieszania się z cieczą oraz rozłożenia dodatku dyspersyjnego.

Celem badań sprawdzających wykonanych w identycznych warunkach konstrukcji układu wlewowego i wnętrza formy - jak to miało miejsce w badaniach modelowych - było sprawdzenie skuteczności badań modelowych, sprawdzenie warunków krystalizacji odlewów (metoda ATD) oraz własności mechanicznych odlewów. Odlewy do badań sprawdzających wykonano z żeliwa ZlCr26.

Celem badań zasadniczych było wykonanie odlewu kształtowego dyszy, pracującej w warunkach zużycia ściernego, z żeliwa ZlCr26 technologią odlewania suspensyjnego, przy zastosowaniu parametrów procesu uzyskanych w badaniach modelowych i sprawdzających.

W badaniach sprawdzających i zasadniczych zastosowano jako dodatek dyspersyjny granulki z żeliwa ZlCr26 o ziarnistości  $0,16-0,32$  mm.

## 3. Badania modelowe i ich analiza

Badania ruchu suspensji ciecz - dodatek stały w układzie wlewowym i wnętrza formy w warunkach naturalnych jest niemożliwe. Niemożliwe jest zwłaszcza wizualizacja mieszania się i przepływu suspensji w pionowych i poziomych elementach układu wlewowego oraz ruchu suspensji w czasie wypełniania wnętrza formy.

Badania modelowe, przy założeniu że stały dodatek dyspersyjny nie rozpuszcza się w ośrodku ciekłym, dają obraz procesu przepływu i wypełniania wnętrza formy, pozwalając obserwować proces przy różnych sposobach doprowadzania cieczy modelowej, przy zmiennych przekrojach poprzecznych elementów układu wlewowego oraz różnych masach właściwych dodatku względem masy właściwej ośrodka ciekłego.

W przeprowadzonych badaniach i obliczeniach zachowano następujące podobieństwo hydrodynamiczne:

- podobieństwo wymiarów liniowych:

$$K_{l,d} = \frac{l_n}{l_m} = \frac{d_n}{d_m} \approx 1$$

- podobieństwo prędkości:

$$K_v = \frac{v_n}{v_m} \approx 1$$

- podobieństwo lepkości obliczone z zależności:

$$R_{e_n} \approx R_{e_m} \quad \text{lub} \quad F_{r_n} \approx F_{r_m};$$

$$R_{e_n} = \frac{v_n d_n}{\nu_n}; \quad R_{e_m} = \frac{v_m d_m}{\nu_m}$$

lub

$$F_{r_n} = \frac{v_n^2}{g d_n}; \quad F_{r_m} = \frac{v_m^2}{g d_m}$$

otrzymując:

$$K_1 = \left(\frac{\nu_n}{\nu_m}\right)^{2/3}$$

gdzie:

$R_e, F_r$  - liczby Reynoldsa i Frouda dla natury (n) i modelu (m)

$\nu$  - lepkość kinematyczna,

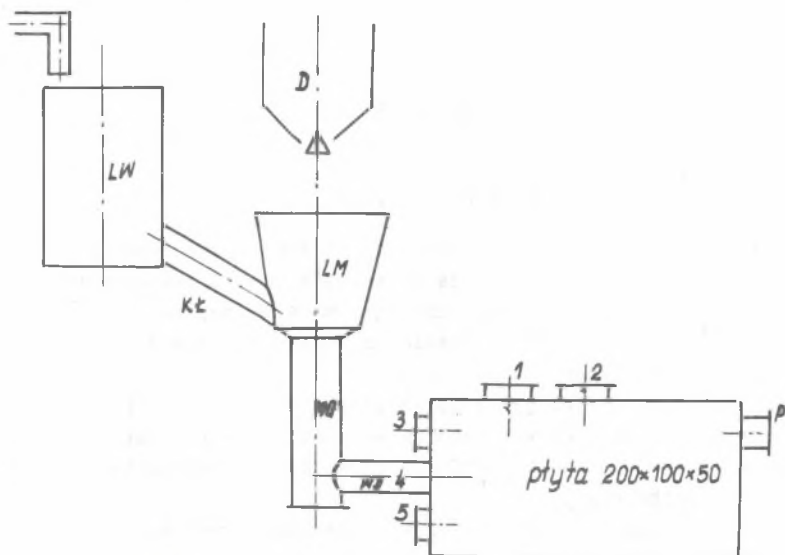
$v$  - prędkość,

$g$  - przyspieszenie ziemskie.

Dla modelowania przepływu stopów żelaza w temperaturze otoczenia za pomocą wody można przyjąć w przybliżeniu, że  $\nu_m \approx \nu_n$ , a zatem:

$$k_1 = \left(\frac{\nu_n}{\nu_m}\right)^{2/3}$$

Oznacza to możliwość badania przepływu ciekłego metalu w naturze przez badania przepływu wody w modelu o tych samych wymiarach.



Rys. 1. Schemat konstrukcji zestawu do modelowego badania procesu suspensyjnego odlewania płyty 200x100x50 mm:

3,4,5 - warianty doprowadzenia wlewów z boku, 1,2 - warianty doprowadzenia wlewów od góry, LW - lejek wlewowy, LM - lejek mieszający, WG - wlew główny, WD - wlew doprowadzający, P - przelew, D - dozownik

Fig. 1. Diagram of system of construction for modeling of the investigation of suspensory casting of plate 200x100x50 mm

Model wykonany z przezroczystego szkła organicznego w skali 1:1 pokazano na rys. 1, na którym zestawiono również różne warianty doprowadzenia do wnętrza formy suspensji modelowej. Badania modelowe wykonano dla dwu wariantów doprowadzenia wlewów od góry i trzech wariantów doprowadzenia suspensji z boku.

Zbadano układy wlewowe o proporcji elementów:

$$F_{WD} : F_{WG} : F_{KŁ} = 1:2,26:2,26 \text{ (typ A)}$$

oraz

$$F_{WD} : F_{WG} :: F_{KŁ} = 1:3,5:2,26 \text{ (typ B)}$$

Oba układy wlewowe są zamknięte.

Jako dyspersyjny dodatek do modelowania procesu odlewania suspensyjnego stosowano materiały o różnej masie właściwej w stosunku do masy właściwej wody, a więc:

- dla  $\rho_d \cong \rho_w$  - polistyren,
- dla  $\rho_d < \rho_w$  - polipropylen,
- dla  $\rho_d > \rho_w$  - ziarna impregnowane gorczycy,

gdzie:

$\rho_d, \rho_w$  - masa właściwa dodatku i wody.

Ziarnistość dodatków wyniosła około 1 - 1,5 mm. W warunkach naturalnych odlewania suspensyjnego różnica mas właściwych dodatku suspensyjnego w stosunku do ciekłego metalu może być znaczna. Ma to bardzo istotne znaczenie w procesie mieszania się ciekłego metalu z dodatkiem, jego "przyswajania" oraz dla konstrukcji układu wlewowego.

W badaniach naturalnych jako dyspersyjny dodatek stały w procesie odlewania suspensyjnego żeliwa wysokochromowego stosowano rodzimy materiał odlewu, a więc granulki żeliwa ZlCr26 (z podwyższoną zawartością węgla - dla ułatwienia rozdrobnienia).

Poniżej przedstawione zostaną wyniki badań modelowych dla  $\rho_d \cong \rho_w$  oraz niektóre charakterystyczne przykłady dla  $\rho_d < \rho_w$  oraz  $\rho_d > \rho_w$ .

Układy wlewowe typu A i B zastosowano do modelowania przy bocznym doprowadzeniu wlewów doprowadzających (wariant 3,4 i 5; patrz rys. 1).

W przypadku modelowania procesu odlewania suspensyjnego z górnym doprowadzeniem cieczy modelującej (wariant 1 i 2) stosowano proporcję przekrojów elementów układu wlewowego:

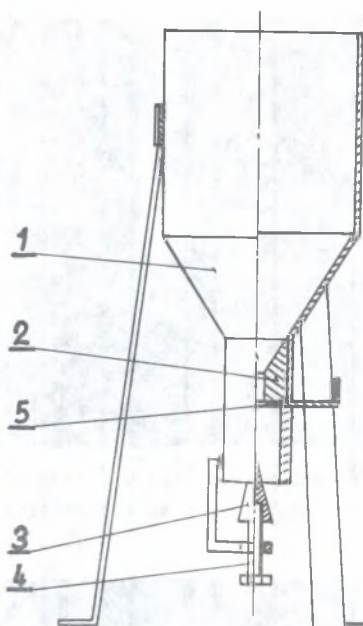
$$F_{WG} : F_{K\bar{L}} = 2,26 : 2,26 = 1 : 1$$

Schemat urządzenia dozującego przedstawia rys. 2.

W układzie wlewowym typu A dla warunku

$\rho_d \cong \rho_w$  i wg wariantu 3,4 i 5 stwierdzono intensywny wirujący ruch wody w lejku mieszającym, co zapewnia dobre wymieszanie się wody z dodatkiem dyspersyjnym.

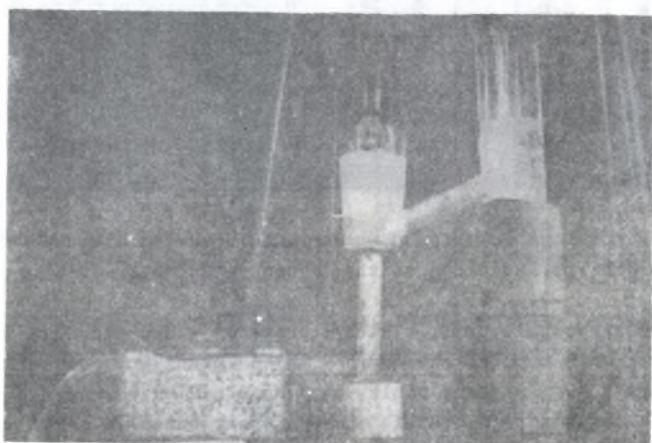
We wlewie głównym obserwuje się burzliwy wirowy ruch suspensji, co sprzyja dalszemu dobremu wymieszaniu się wody z dodatkiem. Wskutek zmiany kierunku przepływu suspensji przy przejściu do wlewu doprowadzającego, stwierdzono, że następuje całkowity zanik ruchu wirowego strugi i częściowe "uspokojenie" burzliwości ruchu. Stopień "uspokojenia" zależy od długości wlewu doprowadzającego. Przy krótkich wlewach doprowadzających widoczne jest mniejsze "uspokojenie" burzliwego przepływu strugi (rys. 3, 4, 5).



Rys. 2. Dozownik:

- 1- zbiornik, 2 - trzpień sterujący, 3 - stożek rozsypany, 4 - regulacja otwarcia zbiornika, 5 - wyzwalacz

Fig. 2. Batcher

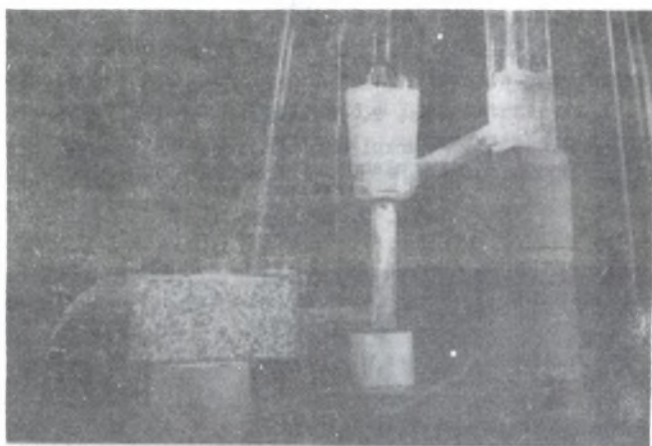


Rys. 3. Modelowanie procesu wg wariantu 3 (układ wlewowy typu A)

Fig. 3. Modeling of the process alternative 3



Rys. 4. Modelowanie procesu wg wariantu 4 (układ wlewowy typu A)  
Fig. 4. Modeling of the process alternative 4

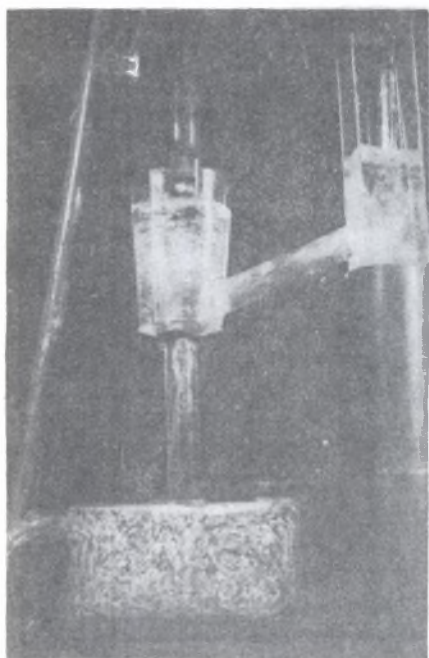


Rys. 5. Modelowanie procesu wg wariantu 5 (układ wlewowy typu A)  
Fig. 5. Modeling of the process alternative 5

W układzie wlewowym typu B, w którym przekrój wlewu głównego jest większy niż w układzie typu A, stwierdzono mniej intensywny ruch wirowy we wlewie głównym i jego szybszy zanik, co jednak nie przeszkadza dobremu wymieszaniu się suspensji, a ułatwia spokojniejszy przepływ przez wlew doprowadzający.

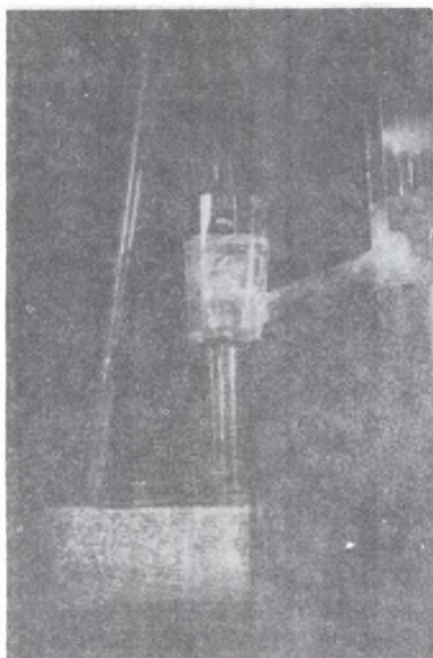


Analizując układy wlewowe typu A i B należy stwierdzić, że korzystniejszy jest układ typu B z powiększonym przekrojem wlewu głównego, w którym następuje dobre wymieszanie suspensji, a w warunkach rzeczywistych - przy dużej masie metalu we wlewie głównym następuje szybsze rozpuszczenie się dodatku dyspersyjnego. Założenie podstawowe technologii odlewania suspensyjnego jest takie, aby dodatek dyspersyjny rozpuścił się w ciekłym stopie co najmniej w 80% swej masy już w układzie wlewowym. W rzeczywistości jednak trudno tak dobrać parametry procesu, aby nie zachodziło we wnęce formy dalsze rozpuszczanie się dodatku, co przy konwekcji wymuszonej stopu, a później swobodnej oraz postępującym krzepnięciu - ma miejsce w każdym odlewie rzeczywistym.



Rys. 6. Modelowanie procesu wg wariantu 1 (układ wlewowy typu A)

Fig. 6. Modeling of the process alternative 1



Rys. 7. Modelowanie procesu wg wariantu 2 (układ wlewowy typu A)

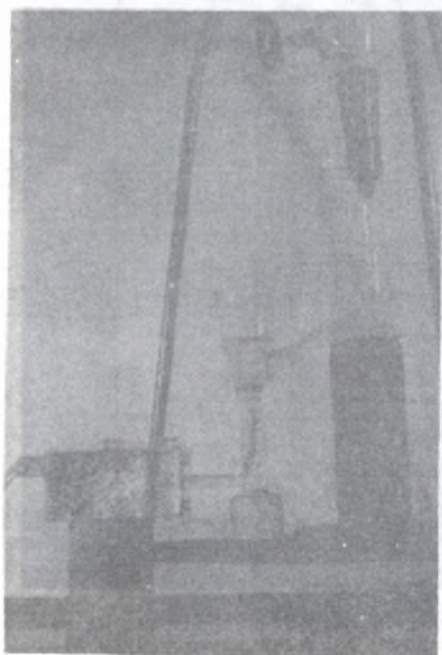
Fig. 7. Modeling of the process alternative 2

Osobnym zagadnieniem jest ruch ciekłego stopu we wnęce formy. Istotny i decydujący wpływ posiadają tutaj konstrukcja i położenie odlewu oraz sposób doprowadzenia metalu.

Na rys. 3-7 przedstawiono ruch suspensji modelującej proces we wnęce formy. Zalewanie od góry powoduje powstanie "martwych pól" w narożach odlewu. Zalewanie z boku jest na ogół korzystne dla tej technologii, chociaż rozło-

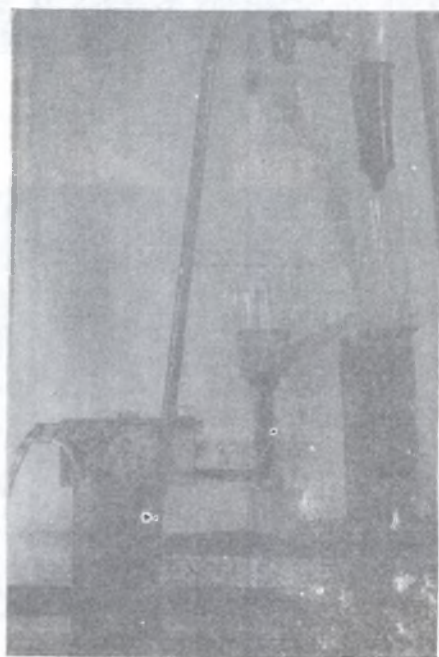
zenie dodatku w objętości odlewu jest najkorzystniejsze przy zalewaniu od dołu i boku w połowie wysokości odlewu.

Wizualizacja ruchu suspensji we wnęce formy mogłaby nasuwać przypuszczenie, że modelowanie fizyczne nie odzwierciedla rzeczywistego procesu, gdyż do wnęki winna wpływać jednorodna suspensja metaliczna o znacznie lub całkowicie obniżonym cieple przegrzania (w zależności od stopnia skomplikowania odlewu) i jednorodnym składzie chemicznym, która w zetknięciu z formą zaczyna krzepnąć objętościowo. Tym niemniej zarówno w modelu, jak i w naturze identyczne są procesy płynięcia i ruchu suspensji przy zachowaniu podobieństwa lepkości i wymiarów geometrycznych, co pozwala na przybliżenie wiązane procesu i wyciągnięcie wniosków dotyczących konstrukcji układu wlewowego i jego doprowadzenia do odlewu.



Rys. 8. Modelowanie procesu dla wariantu  $\rho_d < \rho_w$  (wariant 4)

Fig. 8. Modeling of the process alternative  $\rho_d < \rho_w$  (4)

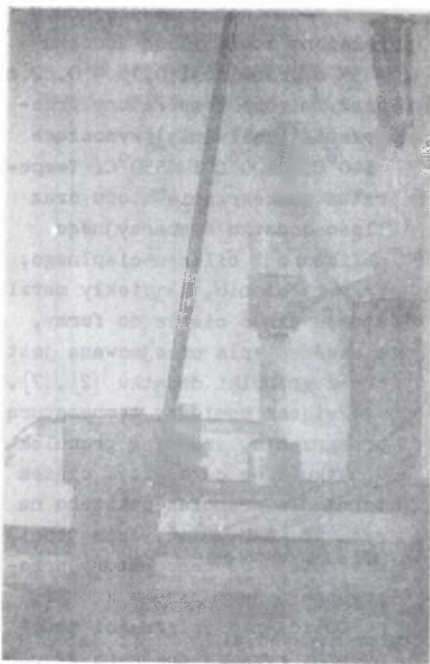


Rys. 9. Modelowanie procesu dla wariantu  $\rho_d < \rho_w$  (wariant 5)

Fig. 9. Modeling of the process alternative  $\rho_d < \rho_w$  (5)

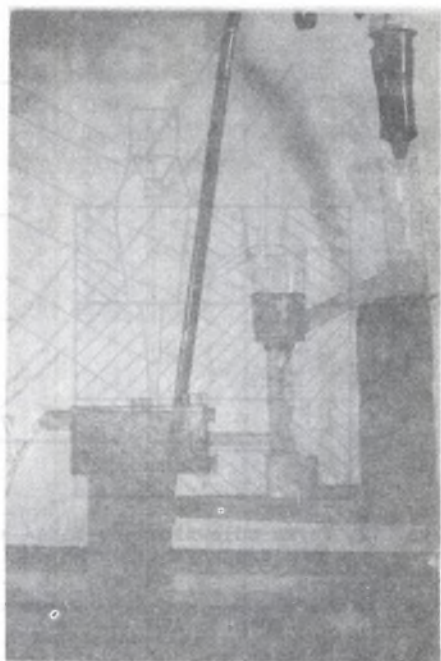
Na rys. 8 i 9 przedstawiono wyniki modelowania procesu dla warunku  $\rho_d < \rho_w$ . Widoczne jest skuteczne mieszanie się suspensji w układzie wlewowym, ale również segregowanie dodatku w górnej części wnęki formy.

Na rys. 10 i 11, dla warunku  $\rho_d > \rho_w$ , pokazano zjawisko segregowania dodatku w dolnej części wnętrza formy.



Rys. 10. Modelowanie procesu dla wariantu  $\rho_d > \rho_w$  (wariant 3)

Fig. 10. Modeling of the process alternative  $\rho_d > \rho_w$  (3)



Rys. 11. Modelowanie procesu dla wariantu  $\rho_d > \rho_w$  (wariant 2)

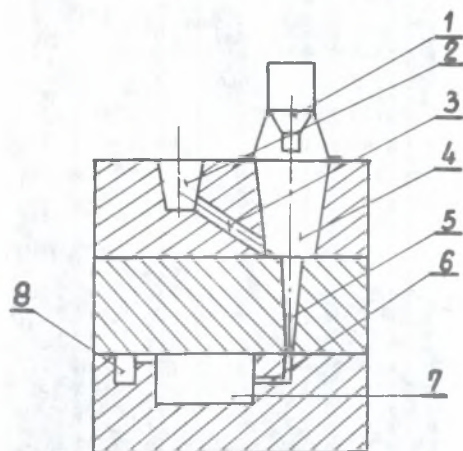
Fig. 11. Modeling of the process alternative  $\rho_d > \rho_w$  (2)

W odniesieniu do warunków naturalnych procesu odlewania suspensyjnego przedstawione wyżej przypadki mają istotne znaczenie wówczas, gdy dodatek dyspersyjny na skutek źle dobranych parametrów procesu nie zdoła rozpuścić się całkowicie w ciekłym stopie w czasie płynięcia w układzie wlewowym.

#### 4. Badania sprawdzające i ich analiza

Na podstawie badań modelowych do badań sprawdzających zastosowano układy wlewowo wg wariantu 3 i 4 (rys. 12) o powiększonych o 20% przekrojach w stosunku do technologii tradycyjnej. Dodatek dyspersyjny podawano z dozownika w ilości 3%. Żeliwo wysokochromowe w odlewach posiadało następujący skład chemiczny: 1,13% C, 0,5% Si, 0,4% Mn, 0,7% P, 0,08% S i 26,5% Cr. Dodatek dyspersyjny posiadał skład chemiczny: 3,05% C, 0,5% Si, 0,55% Mn, 0,11% P,

0,035% S, oraz 27,8% Cr. Podwyższona zawartość węgla do 3,05% była niezbędna dla łatwiejszej granulacji i rozdrabniania. Żeliwo wytapiano w piecu indukcyjnym o pojemności 50 kg, mierząc przed spustem i przed zalewaniem temperaturę przegrzania.



Rys. 12. Forma odlewnicza do badań sprawdzających:

1 - dozownik, 2 - LW, 3 - KŁ, 4 - LM,  
5 - WG, 6 - WD, 7 - wnęka, 8 - kubek,  
E010 do ATD

Fig. 12. Casting mould for test investigations

Istnieje ścisły związek pomiędzy ilością dodatku, jego granulacją, temperaturą przegrzania stopu a makro- i mikrostrukturą odlewów.

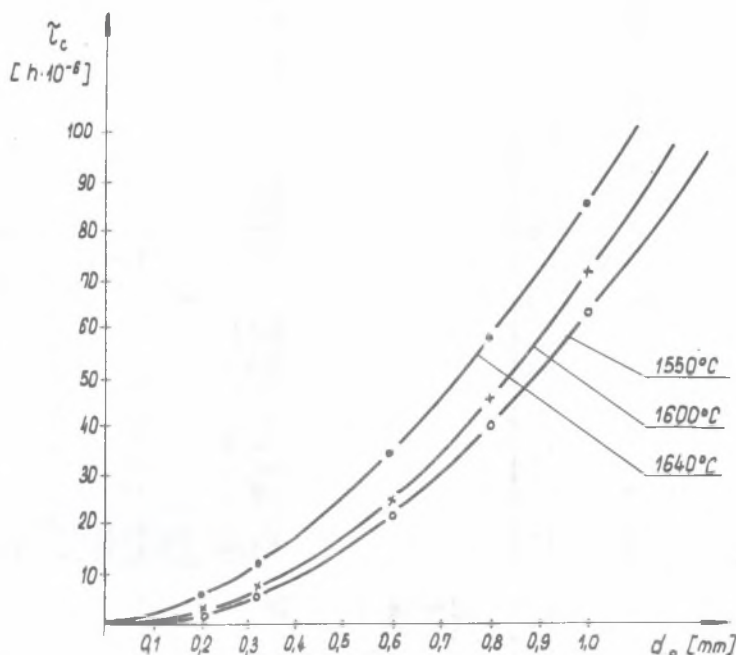
Na rys. 14a pokazano grubokrystaliczną i na brzegach odlewu dendrytyczną makrostrukturę odlewu wzorcowego bez dodatku dyspersyjnego, zalewanego przy temperaturze przegrzania 1550°C. Dendrytyczna i grubokrystaliczna struktura całkowicie zanika po wprowadzeniu 3% dodatku przy tej samej temperaturze przegrzania (rys. 14b). Podwyższenie natomiast temperatury przegrzania do 1600°C i 1640°C (rys. 14c i d) powoduje ponowny wzrost wielkości ziarn.

Z przedstawionych rysunków widać, że wzrost temperatury przegrzania żeliwa dla stałej masy dodatku i jego granulacji powoduje zanik efektu "modyfikacji" struktury i budowy krystalicznej odlewu. Spowodowane to jest faktem przedwczesnego rozpuszczania się dodatku, przejmowania zbyt małej ilości ciepła przegrzania, zaniku efektu dodatkowych ośrodków krystalizacji wskutek czego odlew krzepnie w sposób zbliżony do konwencjonalnego.

W badaniach sprawdzających założono stałą ilość dodatku - 3% o granulacji 0,16 - 0,32 mm oraz zmienne temperatury przegrzania (zalewania) wynoszące 1640°C, 1600°C i 1550°C. Temperaturę przegrzania stopu oraz ilość dodatku dyspersyjnego obliczono z bilansu cieplnego, przy założeniu, że ciekły metal oddaje część ciepła do formy, a część ciepła przejmowana jest przez granulki dodatku [2], [7].

Związek pomiędzy temperaturą przegrzania, średnicą granulek dodatku oraz całkowitym czasem topnienia granulek pokazano na rys. 13. Jak widać, czas topnienia zależy od temperatury przegrzania i jest bardzo krótki.

Obliczenia zależności podanych na rys. 13 dokonano w oparciu o literaturę [6], przy założeniu, że ciepło odlewu przekazywane jest formie i granulkom.



Rys. 13. Zależność czasu roztopienia się dodatku ( $\tau_c$ ) od jego średnicy ( $d_0$ ) dla różnych temperatur przegrzania ( $T_p$ )

Fig. 13. Relation between the time of meltdown of addition ( $\tau_c$ ) and the diameter ( $d_0$ ) for different overheat temperatures ( $T_p$ )

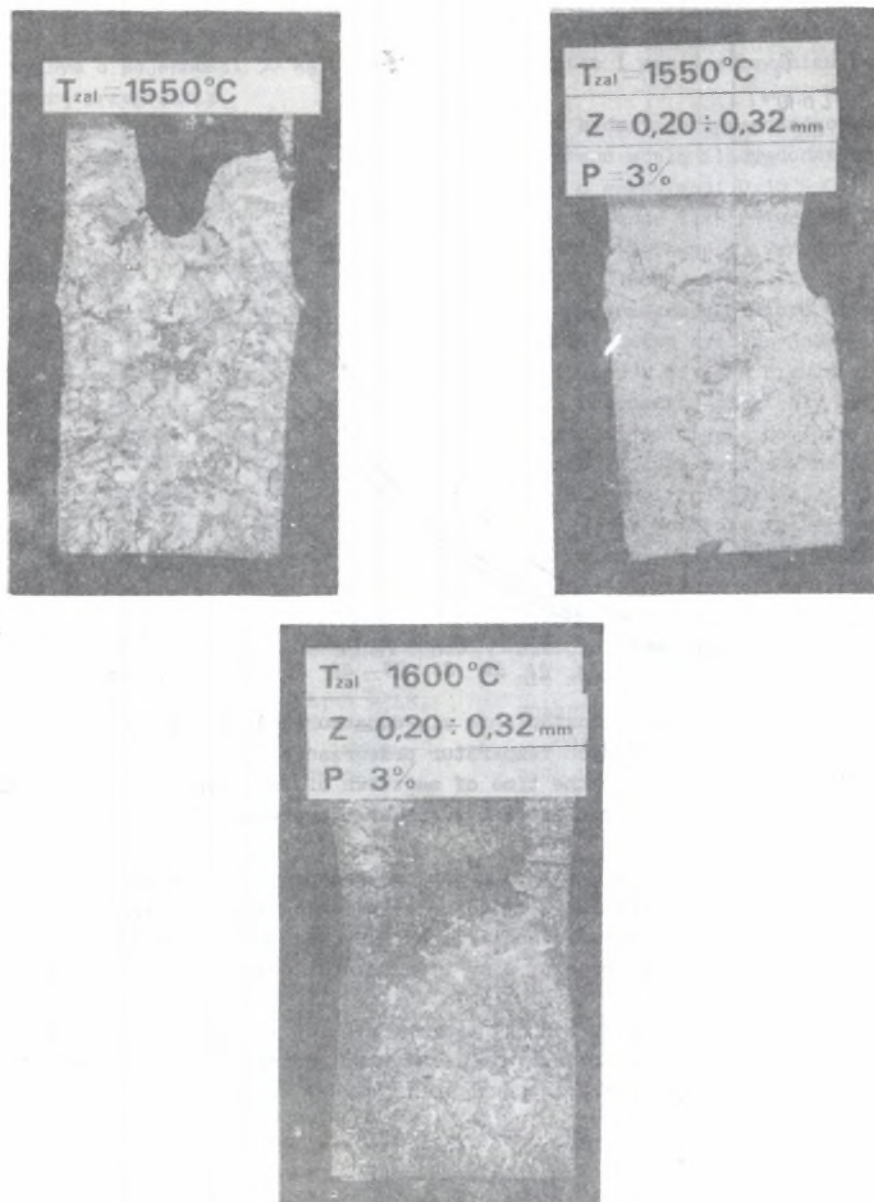
Powyższe fakty wskazują na trudności tej technologii spowodowane koniecznością precyzyjnego określania sposobem obliczeniowym lub doświadczalnym najważniejszych parametrów technologicznych procesu odlewania suspensyjnego, a więc temperatury przegrzania, masy i granulacji dodatku w stosunku masy odlewu.

Na podstawie wykonanych badań można stwierdzić, że dla odlewów o grubości ścianki około 50 mm korzystnymi parametrami procesu odlewania suspensyjnego powodującymi największe rozdrobnienie budowy ziarnowej są:

- temperatura przegrzania ok. 1550°C,
- masa dodatku - 3%,
- ziarnistość dodatku ok. 0,3 mm.

Badania mechaniczne potwierdziły korzystne własności odlewów suspencyjnych.

Badania twardości metodą Brinella wykonano na oszlifowanych płaszczyznach łocnych oraz na przekrojach odlewu płyty. Dla optymalnych parametrów procesu zapewniających całkowity zanik budowy dendrytycznej oraz znaczne roz-



Rys. 14. Makrostruktury odlewów suspensyjnych:

a - wzorcowego, b - suspensyjnego dla  $T_p = 1550^\circ\text{C}$ , c - suspensyjnego dla  $T_p = 1600^\circ\text{C}$ , d - suspensyjnego dla  $T_p = 1640^\circ\text{C}$

Fig. 14. Macrostructures of suspensory casting:

a - standard, b - suspensory  $T_p = 1550^\circ\text{C}$ , c - suspensory for  $T_p = 1600^\circ\text{C}$ , d - suspensory for  $T_p = 1640^\circ\text{C}$

drobienie ziarn stwierdzono, że w porównaniu z odlewem wzorcowym (bez dodatku dyspersyjnego) nastąpił nieznaczny wzrost twardości, natomiast obserwuje się bardzo dużą jednorodność twardości we wszystkich przekrojach odlewu (tablica 1).

Badania udarności wykonano na próbkach przyłanych i na młocie Charpy'ego.

Tablica 1

Wyniki badań twardości odlewów z żeliwa ZlCr26  
(odlew wzorcowy:  $T_{zal} = 1600^{\circ}C$ , odlew suspensyjny:  $T_{zal} = 1600^{\circ}C$ ,  
ilość dodatku - 3%, granulacja 0,2 - 0,32 mm)

Miejsce	Odelew wzorcowy			Odelew suspensyjny		
	I	II	III	I	II	III
Góra	235	229	235	262	255	255
Środek	217	248	229	255	255	255
Dół	229	223	229	262	256	256

I, II, III - brzeg, środek, brzeg.

Tablica 2

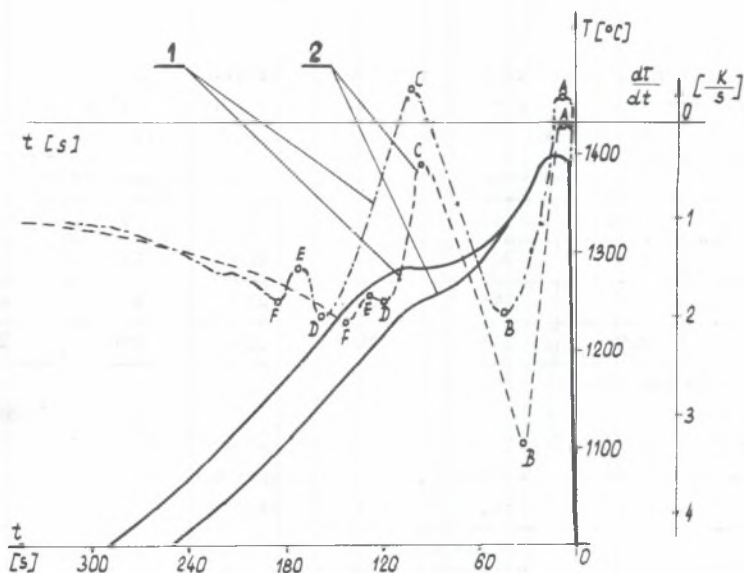
Wyniki badań udarności żeliwa ZlCr26 odlewane suspensyjnie  
(odlew wzorcowy:  $T_{zal} = 1600^{\circ}C$ , idlew suspensyjny:  $T_{zal} = 1600^{\circ}C$ ,  
 $P = 3\%$ ,  $Z = 0,2 - 0,32$  mm)

Nr badania	Odelew wzorcowy	Odelew suspensyjny
	$J/cm^2$	$J/cm^2$
1	1,6	3,8
2	2,0	4,5
3	1,8	5,5
4	1,8	4,5
5	1,6	4,5
6	1,6	3,8

Wyniki badań dla optymalnych parametrów procesu odlewania suspensyjnego ilustruje tablica 2. Obserwuje się znaczny wzrost udarności.

Jednocześnie z badaniami sprawdzającymi parametrów technologicznych procesu odlewania suspensyjnego prowadzono analizę procesu krystalizacji rejestrując wg metody ATD [4] krzywą  $T = f(t)$  oraz jej pochodną  $\frac{dT}{dt}$  (rys. 15). Celem tych badań było stwierdzenie zmian procesu krystalizacji odlewu wzorcowego i odlewów suspensyjnych. Analiza ATD w pełni potwierdziła fakt, że proces odlewania suspensyjnego w porównaniu do odlewu wzorcowego posiada odmienną charakterystykę krystalizacji, co uwidacznia się przyspieszonym

przebiegiem niemal wszystkich charakterystycznych etapów procesu krystalizacji. Ma to ścisły związek z krystalizacją faz węglików. Stwierdzono, że w objętości odlewu występują węgliki bardzo drobne i równomiernie rozłożone. Ma to niewątpliwie wpływ na przyszłe własności eksploatacyjne odlewów.



Rys. 15. Porównanie wykresów ATD dla odlewu wzorcowego (1) i suspensyjnego (2)

Fig. 15. Comparison of ATD diagrams for standard casting and suspensory

Analiza statystyczna krzywych ATD pozwoliła uzależnić wielkość ziarna w odlewie (dla zadanych stałych parametrów procesu technologicznego) od charakterystycznych identyfikacyjnych punktów na krzywych.

Dla parametrów  $T_p = 1550^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 3\%$ ,  $Z = 0,2-0,32$  mm równanie regresji na wielkość ziarna posiada postać:

$$WZ = 18,13 - 2,4 TF - 1,77 TB - 0,016 TA$$

gdzie:

TF, TB, TA - wartość temperatury w punktach F, B i A (rys. 15).

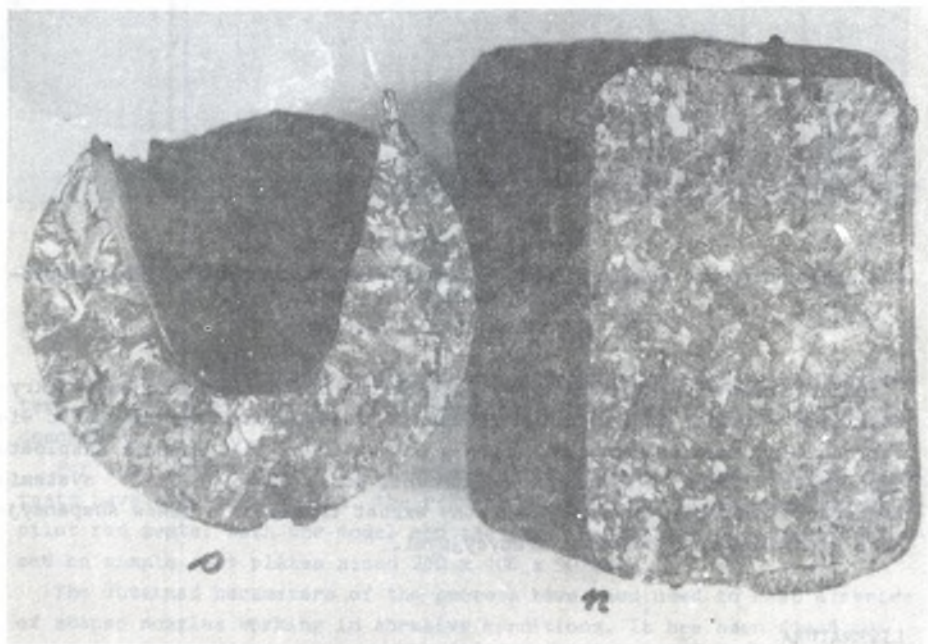


### 5. Badania zasadnicze

W badaniach zasadniczych wykonano serię odlewów dysz z żeliwa Z1Cr26. Jest to odlew o średnim stopniu skomplikowania i grubości ścianek od 12 - - 30 mm z jednym rdzeniem. W technologii tradycyjnej stosowano nadlew, którego zadaniem było zasilanie najgrubszych części odlewu, wobec wysokiej temperatury zalewania wynoszącej około 1540°C.

W technologii odlewania suspensyjnego odlewu dyszy zastosowano sprawdzone wcześniej parametry procesu. Początkowo odlew wykonywano z nadlewem, później z nadlewem zrezygnowano, bez ujemnych skutków dla jakości odlewu.

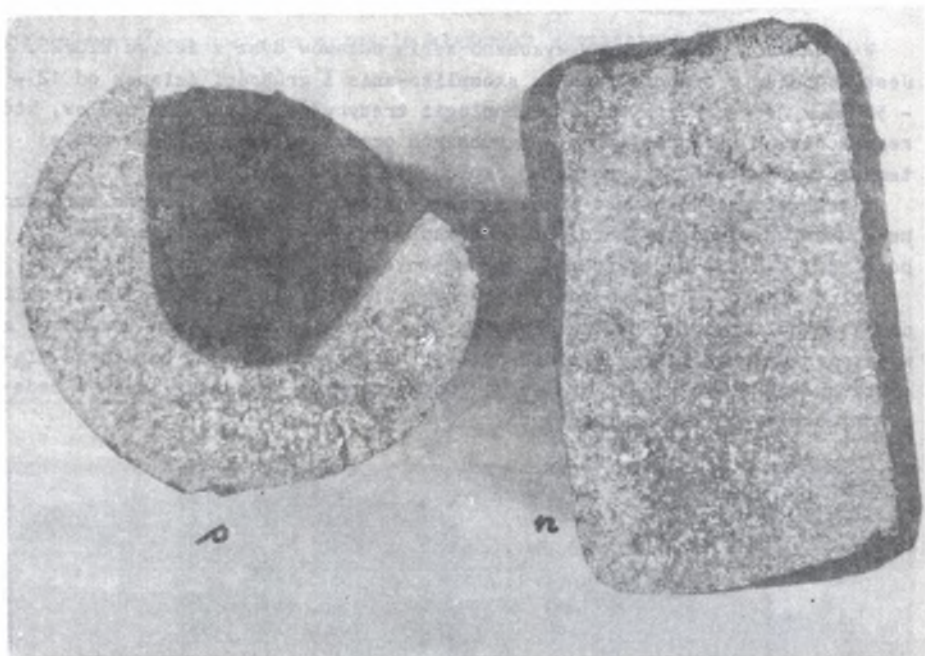
Układ wlewowy, doprowadzony w płaszczyźnie podziąłu z boku odlewu, obliczony został tradycyjnie, należało go jednak powiększyć, wobec trudności z wypełnieniem wnęki formy o ponad 30% pierwotnego przekroju. Pozostałe elementy układu wlewowego wg proporcji (układ typu B) przedstawionych w badaniach modelowych i sprawdzających.



Rys. 16a. Odlew dyszy:

a - makrostruktura odlewu tradycyjnego, b - makrostruktura odlewu suspensyjnego, o - odlew, n - nadlew

Fig. 16a. Nozzle casting



Rys. 16.b. Odlew dyszy:

a - makrostruktura odlewu tradycyjnego, b - makrostruktura odlewu suspensyjnego, o - odlew, n - nadlew

Fig. 16b. Nozzle casting

Badania makrostruktury dysz wykazały bardzo drobnoziarnistą budowę krystaliczną w każdej części odlewu łącznie z nadlewem, którego masywność wielokrotnie przekracza masywność ścianek odlewu (rys. 16). Badania eksploatacyjne dysz w jednej z krajowych elektrowni, gdzie stosowane są w systemie transportu popiołów, wykazały 4-krotny wzrost trwałości odlewów suspensyjnych w porównaniu z odlewami tradycyjnymi.

#### LITERATURA

- [1] Braszczyński J.: Teoria procesów odlewniczych. Cz.II Krystalizacja i kształtowanie powierzchni odlewów. Częstochowa 1976.
- [2] Zatułowski S.S.: Suspensyjonnaja razliwka. Kijów 1981.
- [3] Sakwa W., Gawroński J.: Suspensyjne żeliwo niskochromowe. Krzepnięcie metali i Stopów, Wydawnictwo PAN, Oddział Katowice 1983, z. 6
- [4] Jura S., Sakwa J.: Gisserei, 1983. nr 1.
- [5] Praca zbiorowa: Suspensjonnoje litjo, AN ZSRR, Kijów, 1977.

- [6] Łykov A.W.: Teoria ciepłoprowodności. Moskwa 1967.
- [7] Gawroński J.: Technologiczne aspekty odlewania suspensyjnego żeliwa wysokochromowego. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń. Wydawnictwo PAN (w druku)

Wpłynęło do Redakcji 7.09.84

Rencenzent: Prof. dr hab. inż. Janusz BRASZCZYŃSKI

#### СУСПЕНЗИОННАЯ РАЗЛИВКА ИЗНОСОСТОЯКИХ СПЛАВОВ

#### Р е з ю м е

В статье рассмотрены исследования самых главных технологических параметров суспензионной разливки чугуна Z1Cr26. Для оценки результатов решений этих параметров проведены модельные исследования. В качестве дисперсных инокуляторов использовано порошок из сплава Z1Cr26.

На основании проведенных исследований и опытно-производственных работ сделаны фасонные отливки мелкого и среднего развеса.

Эксплуатационные свойства фасонных отливок это увеличение срока службы деталей на 30-40% в результате улучшения физико-механических и специальных свойств.

#### SUSPENSORY CASTING OF WEAR RESISTANT ALLOYS

#### S u m m a r y

In the paper tests concerning the most important technological parameters of suspensory casting of high-chromatic cast iron Z1Cr26 have been described.

For the correct selection of technical parameters of the process, model tests have been carried out, the results of which have been compared with pilot red tests. Both the model and the pilot real tests have been performed on simple cast plates sized 250 x 100 x 50 mm.

The obtained parameters of the process have been used to cast a series of shaped nozzles working in abrasive conditions. It has been found out that some mechanical properties of suspensory casts and exploitation properties are higher and more profitable than the characteristics of traditional casts.