

Modelne raziskave v jeklarstvu

Model Research in Steel Production

D. Lesjak, J. Lamut, V. Gontarev, A. Purkat, *Oddelek za montanistiko, FNT Ljubljana, Aškerčeva 20*

in

M. Debelak, *Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, Ljubljana*

Vmesno korito (ponovca), ki je del naprave za kontinuirno litje, služi kot vezni člen med livnim loncem in kokilo oz. kristalizatorjem. Njegova funkcija je razdelitev taline med posamezne žile in kot zbiralec taline med menjavo livnih loncev pri sekvenčnem vlišanju. Med mestom dotoka taline v vmesno korito in posameznimi iztoki se talina intenzivno premešava. Najprimernejši način analize toka taline v vmesnem koritu je fizikalno in matematično modeliranje v modelih iz poliakrilnega stekla.

V tekstu je opis in grafični prikaz tokov v vmesnem koritu. Na osnovi video posnetkov in fotografskih posnetkov smo določili tokovnice oz. smeri toka tekočine v modelu vmesnega korita in prikazali gibanje taline v vmesnih koritih.

Tundish as a part of continuous casting equipment connects casting ladle and mould. Its function is the distribution of melt to single strands, and to be melt accumulator during the ladle change in sequential casting. Between the melt inflow to tundish and single outflows, the melt is intensively mixed by turbulence. The most suitable way of analyzing melt flows in the tundish are physical scaled models made of plexiglas, and mathematical modelling.

Paper describes and graphically presents fluid flows in the tundish model. Video recording and photographic methods enables to determine the flow lines and flow directions, and thus the flow of melt in the tundish can be forecast.

1 Uvod

Z razvojem kontinuirnega litja se je del rafinacijskih postopkov prenesel iz rafinacijskega livnega lonca v vmesno korito. Vmesno korito ni več le zbiralni in razdelilni agregat, ampak se v njem vrši tudi rafinacija nekovinskih vključkov. Za uspešnejšo rafinacijo je naraščal volumen taline v vmesnem koritu tako, da danes dosega približno četrtno volumna livnega lonca. Vendar pa je tok taline, ki nastane zaradi termičnih reakcij in umetnega premešavanja nekontroliran. Rezultati iz prakse kažejo, da je čistost končnih produktov na posameznih žilah različna. Z umetno vstavljenimi regulatorji toka taline, kot so zgornje in spodnje pregrade in pregrade z odprtini, ustvarimo kontroliran in enakomerniški tok taline. S pravilno namestitvijo regulatorjev toka pa tudi umirimo celotno talino tako, da ne pride do mešanja prekrivnega praška s talino in premočnih reakcij z ognjevarno obzidavo.

2 Nekovinski vključki v jeklu

Ko pride staljen kovinski tok med vlišanjem v stik z zrakom se reoksidira, kar povzroči večjo onesnaženost jekla z nekovinskimi vključki. Posledica vrtnčenja pri praznjenju ponovce je vlek žlindre in s tem povečano število nekovinskih vključkov v jeklu. Zaradi vrtnceva lahko dobimo žlindro po celem volumnu taline¹. Nekovinski vključki, ki ostanejo v jeklu, predstavljajo največji problem za kakovost izdelkov. Nastanek vključkov v talini je različen. Mikro-vključki, velikosti 1–5 μm , nastanejo zaradi različnih metalurških obdelav taline, kot npr. razžveplanja, oksidacije, dezoksidacije in legiranja. Makro-vključki, velikosti $>50 \mu\text{m}$, pa lahko nastanejo iz prekrivnega praška

v vmesnem koritu, praška iz kokile, kot posledica reoksidacije taline in ognjevarnega materiala. Takši vključki so v jeklu najbolj škodljivi².

Novejše raziskave so pokazale, da je lahko rafinacija nekovinskih vključkov v vmesnem koritu manjše kapacitete in z uporabo usmerjevalcev (regulatorjev) toka prav tako uspešna, kot v agregatu z večjo kapaciteto, vendar brez uporabe regulatorjev toka².

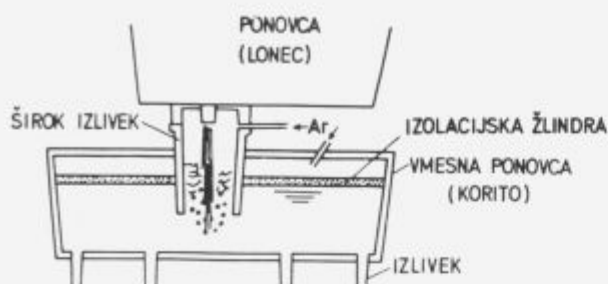
K. Iwata s sodelavci³ je namesto pregrad uporabil širok okrogel izlivek, ki se je tesno prilegal na livni lonec in je bil potopljen v talino v vmesnem koritu. Dostopa zraka ni bilo, pač pa so s strani vpihovali argon. Z vpihovanjem argona so dobili močno gibanje proti površini, ki so ga ustvarili dvigajoči se mehurčki. Na sliki 1 vidimo celoten sistem. Na slikah 1a in 1b je podana primerjava med nastalim tokom taline pri vpihovanju argona v širok okrogel izlivek (široko grlo) in nastalim tokom pri dotoku taline skozi globoko potopljen izlivek z jezom. Primerjava tokov na obeh slikah kaže, da se z argonom mešana talina bolje usmeri proti površini, kar je ugodnejše za rafinacijo nekovinskih vključkov.

V dotočni curek so vbrizgali³ akrilni prah za opazovanje in merjenje pretoka ter določili stopnjo izločanja nekovinskih vključkov. Stopnja izločanja nekovinskih vključkov je definirana z enačbo (1):

$$\eta = 100 \frac{C_o}{C_i} \quad (1)$$

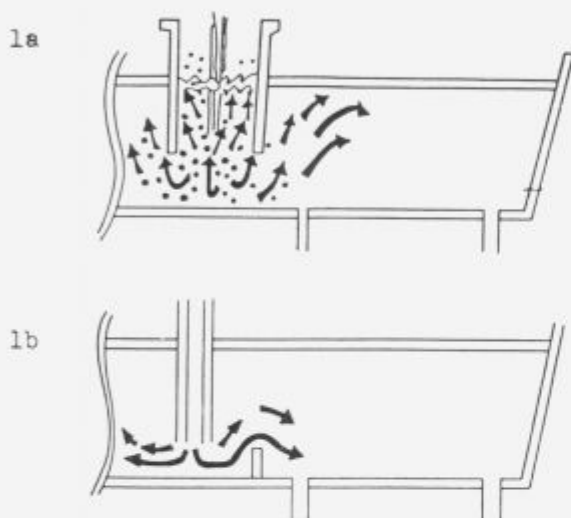
kjer pomenijo:

η stopnja izločanja nekovinskih vključkov, v %
 C_o, C_i končna in začetna koncentracija prahu.



Slika 1. Shematski prikaz sistema s širokim okroglim izlivkom.

Figure 1. Schematic illustration of "big tube shroud".



Slika 1. a) in b) Primerjava nastalih tokov z uporabo širokega okroglega izlivka in v talino potopljenim izlivkom z jezom.

Figure 1. a) and b) Comparison of flow pattern in the tundish using a "big tube shroud" and a long nozzle and a lower weir.

Na sliki 2 je prikazana odvisnost med stopnjo izločanja nekovinskih vključkov in časom zadrževanja fluida v vmesnem koritu. Rezultati so pokazali, da so tokovi, nastali z dvigajočimi mehurčki argona boljši za separacijo nekovinskih vključkov, kot pa globoko v talino potopljen izlivek s spodnjo pregrado.

3 Podobnost modela z realnim reaktorjem

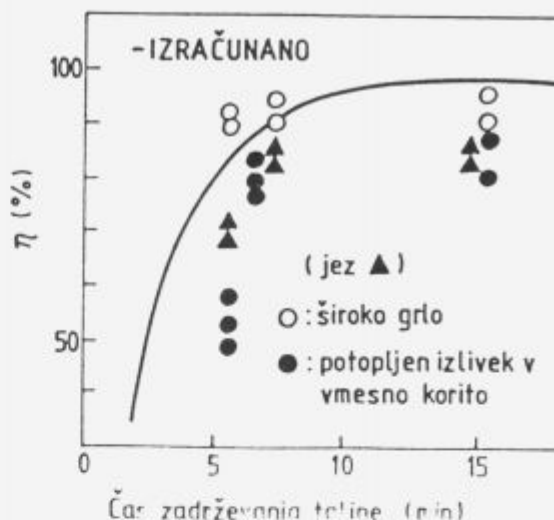
Za uspešno simulacijo in točnost dobljenih rezultatov morajo biti zagotovljeni pogoji podobnosti: geometrična, kinematična, dinamična in toplotna podobnost.

Kinematična podobnost je zagotovljena z geometrično in dinamično podobnostjo. Za zagotovitev absolutne dinamične podobnosti morajo biti vsa tri brezdimenzijska števila enaka v obeh sistemih, kar pa je realno težko doseči⁵.

Osnovna brezdimenzijska števila, s katerimi določamo podobnost med modelom in realnim reaktorjem so:

- Freudovo število:

$$Fr = \frac{v^2}{gd} \quad (2)$$



Slika 2. Odvisnost med stopnjo izločanja nekovinskih vključkov in časom zadrževanja taline.

Figure 2. Relationship between the residence time and the efficiency of inclusion removal in the tundish.

- Reynoldsovo število:

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (3)$$

- Webrovo število:

$$Wb = \frac{\rho v^2 d}{\sigma} \quad (4)$$

kjer pomenijo:

- v hitrost pretoka tekočine (m/s)
- g gravitacijski pospešek (m/s²)
- d hidravlični premer (m)
- ν kinematična viskoznost (mm²/s)
- ρ gostota (kg/dm³)
- σ površinska napetost

Pri analiziranju toka taline se za poskuse v modelu največkrat uporablja voda, ker imata voda pri sobni temperaturi in jeklo pri temperaturi izdelave podobno kinematično viskoznost. V tabeli 1 so podane fizikalne lastnosti vode in jekla⁵.

Tabela 1. Fizikalne lastnosti fluidov.

	Voda	Jeklo
Temperatura	20°C	1600°C
Dinamična viskoznost	1 mNs/m ²	5 mNs/m ²
Kinematična viskoznost	1 mm ² /s	0.72 mm ² /s
Gostota	1 kg/dm ³	7.08 kg/dm ³

Ko gre jeklo skozi vmesno korito je podvrženo različnim procesom. Med gibanjem taline proti izlivku potekajo reakcije med talino in prekrivnim praškom, pojavi se lahko reoksidacija taline, če le-ta pride v stik z zrakom, talina reagira

z ognjevzdržnim materialom⁶. Da bi razumeli, kako ti procesi vplivajo na talino, moramo določiti čas zadrževanja jekla v vmesnem koritu. Lahko izračunamo teoretični čas zadrževanja, kot:

$$\bar{t} = \frac{V}{f} = \frac{\text{volumen vmesnega korita}}{\text{volumsko pretočno razmerje}} \quad (5)$$

V praksi so ugotovili, da se talina na nekaterih mestih zadržuje v vmesnem koritu dalj časa kot na drugih. S poskusi so pokazali, da so v vmesnem koritu t.i. mrtvi prostori. V teh območjih se talina zadržuje enkrat ali dvakrat dlje, kot to določa teoretični čas zadrževanja. V teh območjih pride lahko do takega znižanja temperature taline, da se pojavi nevarnost podhladitve oz. zamrznitve taline⁷. Ta pojav povzroči, da je čas zadrževanja dela taline krajši od teoretičnega. Željeno je, da se izognemo mrtvemu volumnu, ker je naš namen čim bolj izkoristiti celoten volumen vmesnega korita.

4 Eksperimentalni del

4.1 Izpeljava faktorja podobnosti

Pri izračunu upoštevamo, da imamo v realnem reaktorju jekleno talino, v modelu iz poliakrilnega stekla pa vodo. Pri gibanju tekočih slojev v modelu in realnem reaktorju nam Reynoldsovo število govori o toku teh slojev. Da dosežemo podobnost gibanja morata biti Reynoldsovi števili za oba sistema enaki:

$$Re_R = Re_M \quad (6)$$

$$\frac{d_R v_R}{\nu_{jekla}} = \frac{d_M v_M}{\nu_{vode}} \quad (7)$$

$$v_R = \frac{d_M \nu_{jekla}}{d_R \nu_{vode}} v_M = K v_M \quad (8)$$

$$K = \frac{d_M \nu_{jekla}}{d_R \nu_{vode}} \quad (9)$$

kjer pomenijo:

- d_M, d_R hidravlična premera modela in realnega reaktorja
- ν_{jekla}, ν_{vode} kinematični viskoznosti
- v_R, v_M hitrosti gibanja tekočine v realnem reaktorju in ekvivalentna hitrost v modelu
- K faktor podobnosti

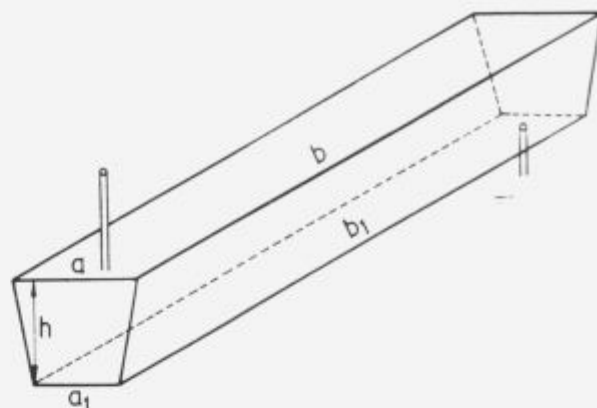
4.2 Enožilna kontinuirna naprava za vlivanje slabov

Iz poliakrilnega stekla smo izdelali dva modela za vmesno korito v merilu 1 : 5 in 1 : 10 glede na velikost naprave v Jeklarni 2 na Jesenicah. Na sliki 3 je shematski prikaz vmesnega korita z dimenzijami realnega reaktorja.

Opazovali smo tok tekočine brez vstavljenih pregrad in z njimi. Vmesno korito smo presvetlili po srednjem preseku in z video kamero snemali nastale tokove. Pretok vode smo uravnovesili tako, da smo dobili konstanten dotok in iztok.

Pretok taline v realnem reaktorju znaša 1.5 t/min. Izračunali smo hitrost gibanja taline v prečnem preseku vmesnega korita po enačbi 10:

$$v_R = \frac{\phi}{A_R} = 6.206 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} \quad (10)$$



Slika 3. Vmesno korito pri enožilni kontinuirni napravi.

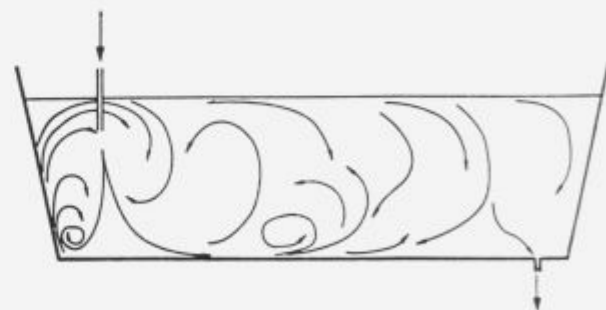
Figure 3. Tundish with one-strand continuous casting machine. Kjer so vrednosti:

$$\begin{aligned} a &= 890 \text{ mm} & b &= 4173 \text{ mm} \\ a_1 &= 630 \text{ mm} & b_1 &= 3848 \text{ mm} \\ h &= 750 \text{ mm} \end{aligned}$$

- A_R presek taline v realnem reaktorju
- ϕ pretok taline

Izračunali smo (po enačbi 8) hitrost vode v prečnem preseku modela v merilu 1 : 5, ki znaša 0.0344 m/s. Faktor podobnosti je enak 0.18. Za manjši model 1 : 10 pa je hitrost vode v prečnem preseku 0.052 m/s, faktor podobnosti pa 0.12.

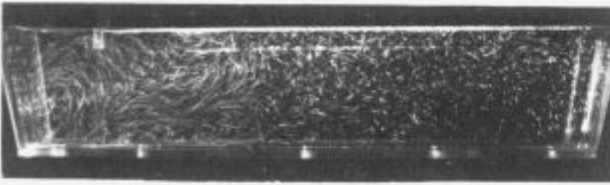
Na sliki 4 je shematsko prikazan tok tekočine v vmesnem koritu. Dotok vode je blizu ene prečne stene, iztok pa ob drugi. Na sliki 5 je fotografski posnetek trenutnega stanja toka tekočine.



Slika 4. Tokovi v modelu vmesnega korita z enim iztokom.

Figure 4. Flow pattern in the tundish model with one nozzle.

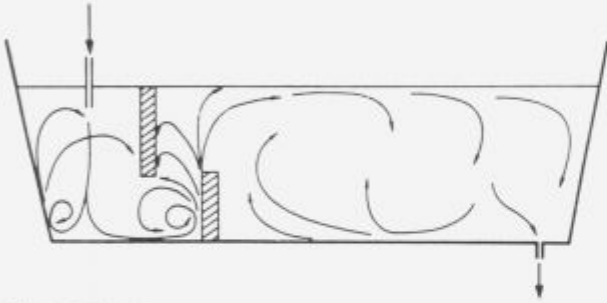
Dotični curek, ki se ob stranski prečni steni korita močno vrtinči, se usmeri proti površini in ustvarja zgornji tok. Drugi del razdeljenega dotičnega curka se usmeri proti iztoku in po dnu vrtinči. Združitev zgornjega in spodnjega toka tekočine se kaže kot močno turbulentno premešavanje po celotnem volumnu vmesnega korita v smeri iztočne odprtine.



Slika 5. Posnetek toka tekočine v modelu 1 : 5.

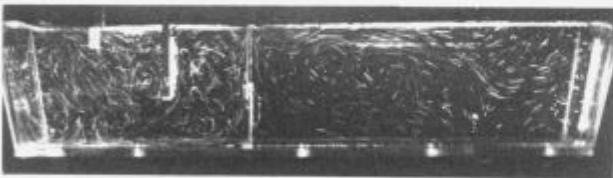
Figure 5. Picture of flow pattern in the tundish 1:5 model.

Tok tekočine (slika 6) je nastal z vstavljenjo zgornjo in spodnjo pregrado. Pri spodnji pregradi se voda usmeri navzgor proti površini, ki jo v realnem reaktorju pokriva pokrivni prah. Nato potuje proti iztočni odprtini, kjer del vode izteče, del pa se ob dnu obrne proti spodnji pregradi in se priključi zgornjemu toku. Fotografski posnetek toka tekočine v vmesnem koritu s pregradami za model 1:10 je prikazan na sliki 7.



Slika 6. Tokovi v vmesnem koritu z enim iztokom z zgornjo in spodnjo pregrado.

Figure 6. Flow pattern in the tundish model with one nozzle and upper and lower weir.



Slika 7. Fotografski posnetek toka tekočine.

Figure 7. Picture of flow pattern in the 1:5 model with one nozzle, and upper and lower weir.

4.3 Trožilna kontinuirna naprava za vlivanje gredic

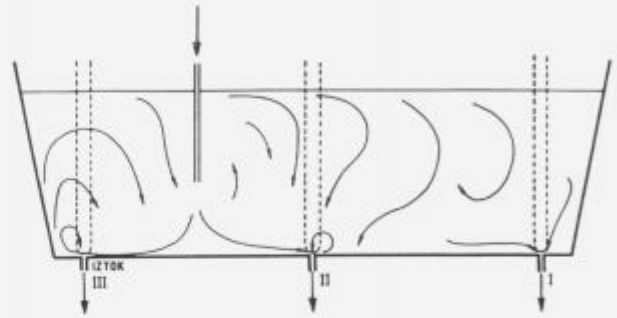
Na modelu vmesnega korita v merilu 1:10 za vlivanje gredic na trožilni kontinuirni napravi smo analizirali tokove, ko tekočina izteka skozi tri izlivke.

Pretok taline v realnem reaktorju je $900 \text{ kg/min} = 2.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Dimenzije realne vmesne ponovce v Štorah so naslednje (oznake dimenzij so iste, kot na sliki 3):

$$\begin{aligned} a &= 862 \text{ mm} & b &= 3260 \text{ mm} \\ a_1 &= 550 \text{ mm} & b_1 &= 2900 \text{ mm} \\ h &= 640 \text{ mm} \end{aligned}$$

Izračunali smo hitrost gibanja taline v delu prečnega preseka med dotokom in iztokom II in znaša $3.87 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$. Ekvivalentna hitrost vode v istem delu modela pa znaša 0.032 m/s .

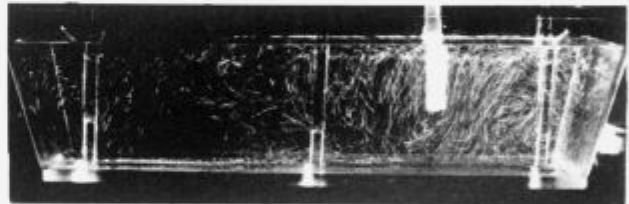
Na sliki 8 je shematski prikaz toka vode pri treh odprtih izlivnih odprtinah in z uporabo zamašnih drogov. Različno obnašanje vode po celotnem volumnu vmesnega korita potrjuje, da je čistost končnih produktov po posameznih žilah različna. Dotok vode je ekscentričen in je med iztokoma II in III.



Slika 8. Prikaz tokov v vmesnem koritu s tremi iztoki.

Figure 8. Flow pattern in the tundish model with three nozzles.

Na fotografem posnetku na sliki 9 je posnetek toka vode. Ob dotoku se tekočina intenzivno premešava. Del tekočine potuje po dnu in ob zamašnih drogovih, nad iztočnima odprtinama I in II ustvari vrtinec.



Slika 9. Fotografski posnetek tokov.

Figure 9. Picture of flow pattern in the model with three nozzles.

Primer postavitve zgornjih pregrad z dotokom tekočine med njima in spodnje pregrade med iztokom II in I je prikazan na sliki 10.

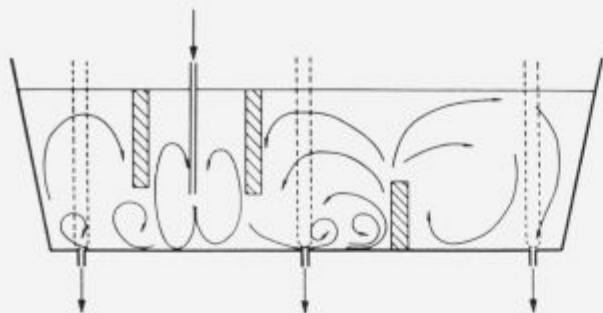
Opazovali smo tudi tokove, ko smo v model vgradili le zgornji pregradi ali pa dve spodnji pregradi. Na sliki 11 so prikazani tokovi, ko smo zgornji pregradi namestili vsako na svojo stan dotoka in na sliki 12 je fotografski posnetek.

Na sliki 13 pa je shematski prikaz tokov, ko smo v model vgradili spodnji pregradi, ki zapirata spodnji del modela in voda teče preko njih.

Za opazovanje tokov smo uporabili tudi pregradni steni z odprtino v obliki trapeza in nizko spodnjo pregrado. Dotok tekočine je bil usmerjen v prostor med pregradama in nastali tokovi so prikazani na sliki 14.

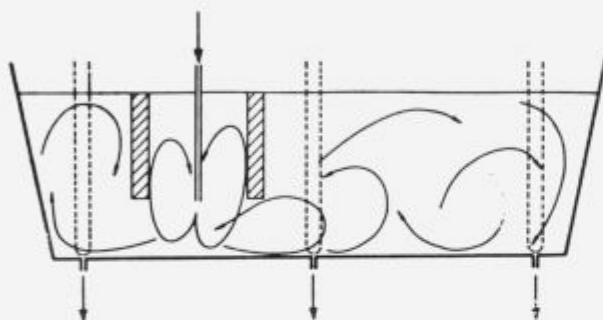
5 Zaključek

Za razdelitev taline med livnim loncem in kokilo uporabljamo vmesno korito. V zadnjem reaktorju kjer je talina, se



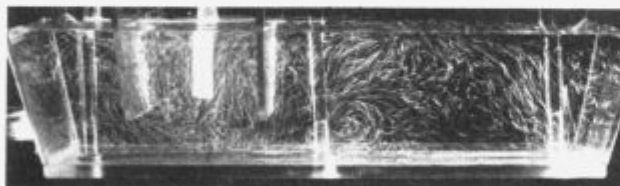
Slika 10. Tokovi v vmesnem koritu s tremi iztoki in s tremi pregradami.

Figure 10. Flow pattern in the model with three nozzles, upper and lower weir.



Slika 11. Prikaz tokov z uporabljenima zgornjima pregradama.

Figure 11. The flow pattern in the tundish with two upper weirs.



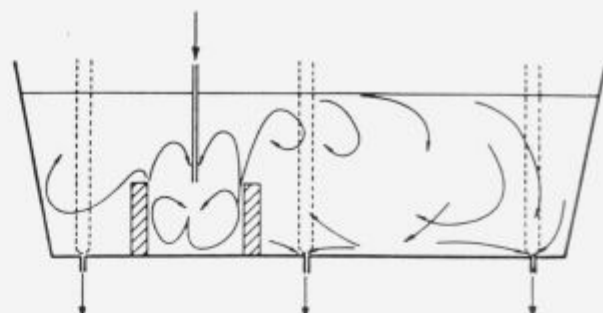
Slika 12. Fotografski posnetek tokov, kot na sliki 11.

Figure 12. Picture of the flows in tundish as in Fig. 11.

lahko vršijo tudi rafinacijski procesi. Zato moramo vedeti, kako se giblje talina v vmesnem koritu med mestom dotoka iz livnega lonca in izlivnim sistemom, ki je lahko na enem mestu, kot je pri vlivanju slabov ali pa na več mestih, kot je to pri vlivanju gredic.

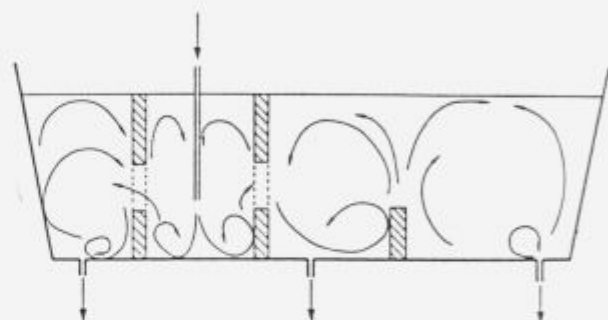
Modelne raziskave so primerne za določitev tokov pri kontinuirnem procesu dotoka in iztoka taline. Za naše raziskave smo izdelali modela iz poliakrilnega stekla za enožilni in trožilni sistem v merilu 1:5 in 1:10. Za usmerjanje toka taline smo v vmesno korito vstavili različne pregrade. Zgornja pregrada zapira zgornji del vmesnega korita (tekočina teče pod njo), spodnja pregrada pa zapira spodnji del vmesnega korita (tekočina teče preko njega). Pregrade smo nameščali na različnih mestih v modelu in analizirali nastale tokove.

Pri modelnih raziskavah je snemanje z video kamero edini način, s katerim lahko analiziramo in opazujemo



Slika 13. Tokovi v vmesnem koritu z dvema spodnjima pregradama.

Figure 13. The flow pattern in the tundish with two lower weirs.



Slika 14. Tokovi v modelu s pregradnima stenama z odprtino in spodnjo pregrado.

Figure 14. The flow pattern in the tundish with two barrier walls, having central openings, and a lower weir.

nastal tok tekočine. Na podlagi video posnetkov smo rezultate prikazali shematično s puščicami, ki kažejo smer toka tekočine. S fotografskimi posnetki pa smo prikazali trenutno stanje toka tekočine v modelu.

Na osnovi naših raziskav lahko sklepamo, da v agregatih ni enakomernega premešavanja, ampak je talina v različnih smereh gibanja. Da bi tudi v tem agregatu opravljali rafinacijo nekovinskih vključkov, je za tok tekočine ugodneje, če so nameščene pregrade.

Delo je bilo izdelano v laboratoriju za procesno tehniko na Odseku za metalurgijo v okviru diplomske naloge.

6 Literatura

- 1 Szekely J., Ilegbusi O.J.: The physical and mathematical modeling of tundish operations, MRE, New York 1989, str. 1-52
- 2 Hintikka S., Kontinen J.: Optimization of molten steel flow in the tundish; 1st European Conference on Continuous Casting; Florence, Italy; september 1991; str. 2.153/2.161
- 3 Iwata K. s sodelavci: Clean steel production using large section bloom caster (on the effect of tundish heater, dam, cover-slag & secondary refining); 1st European Conference on Continuous Casting; Florence, Italy; september 1991; str. 2.145/2.152
- 4 Lamut J., Gontarev V., Lesjak D., Purkat A.: Modelne raziskave v ekstraktivni metalurgiji. Poročilo katedre za ekstraktivno metalurgijo, FNT, Univerza v Ljubljani, 1991
- 5 Heaslip J.L., McLean A., Sommerville I.D.; Continuous Casting Vol. 1; ISS-AIME 1983; Fluid Flow; str. 67/97

- ⁶ Andrzejewski P., Diener A., Pluschkell W.; Model investigations of slag flow during last stage of ladle teeming, *Steel research* 58, (1987), No. 12, str. 547/552
- ⁷ Chakarborty S., Sahai Y.; Effect of varying ladle stream temperature on melt flow and heat transfer in continuous casting tundishes, *ISIJ International*, Vol. 31, (1991), No. 9, str. 960/967
- ⁸ Purkat A.; Modeliranje v sekundarnih rafinacijskih reaktorjih, Diplomsko delo, Oddelek za metalurgijo, FNT, Univerza v Ljubljani, 1991