

# Modeliranje prenosa toplote in snovi pri kontinuiranem ulivanju - modela ACRONI Jesenice in IMPOL Slovenska Bistrica

## Modelling of Continuous Casting Heat and Mass Transfer - Models of ACRONI Jesenice and IMPOL Slovenska Bistrica

Božidar Šarler, Aleš Košir, Odsek za reaktorsko tehniko, Institut Jožef Stefan, Ljubljana

*Opisano je modeliranje prenosa toplote in snovi ingota med kontinuiranim ulivanjem. Podrobno sta opisana in predstavljena specifična modela ACRONI Jesenice (kontinuirano ulivanje jekel) in IMPOL Slovenska Bistrica (polkontinuirano ulivanje aluminijevih zlitin).*

*Ključne besede: Kontinuirano ulivanje, prenos toplote in snovi, temperaturno polje.*

*Modelling of the ingot heat and mass transfer during the continuous casting process is presented. The models for ACRONI Jesenice (continuous casting of steel) and IMPOL Slovenska Bistrica (semicontinuous casting of aluminium alloys) are described and presented in detail.*

*Key words: Continuous casting, heat and mass transfer, temperature field.*

### 1 Uvod

Model predstavlja fizikalni, matematični in kvantitativni popis pojava. Uporablja se za pojasnjevanje naravnih pojavov v osnovnih raziskavah in tehnoloških procesov pri inženirskem projektiranju. Modeliranje sestavlja primerna izbira fizikalnega sistema (fizikalnih zakonov in fizikalnih konceptov), matematičnega sistema (matematičnih konceptov, splošnih aksiomov in konstitutivnih aksiomov), in modela (na podlagi številnih poenostavitvev). Model vedno kvantitativno ovrednotimo - rešimo. Rešitev lahko izpeljemo na podlagi natančne rešitve, korelacije ali numeričnih rešitev. Model potrdimo na podlagi primerjave kvantitativnih rezultatov z vrednostmi dobljenimi pri meritvah. Na ta način ovrednotimo smiselnost številnih poenostavitvev in preverimo tako model kot meritve. Modeliranje v tehnologiji gradiv predstavlja iskanje povezav med procesnimi spremenljivkami in makrostrukturno gradiva, mikrostrukturno ter mikrostrukturno gradiva in mikrostrukturno ter lastnostmi gradiva. Poglavitni cilj modeliranja v tehnologiji gradiv je zmožnost ocene lastnosti obnašanja gradiva v odvisnosti od procesnih spremenljivk njegove izdelave, predelave ali uporabe.

### 2 Modeliranje kontinuiranega ulivanja

Dandanes znanje kontinuiranega ulivanja temelji na empiričnem znanju ter na direktnem in inverznem modeliranju. Pri direktnem modeliranju skušamo predvideti naprimer odvisnost mikrostrukture ulitka od danih procesnih parametrov, pri inverznem modeliranju pa naprimer procesne parametre, ki dajo željeno mikrostrukturno ulitka. Kvaliteto kontinuirano ulitega proizvoda zagotavljamo<sup>1</sup> na podlagi razumevanja procesa njegove izdelave, z možnostjo spremljanja in regulacije tega procesa ter s primerno organizacijo dela pri tem. V zvezi s poglobljenim razumevanjem in izboljšanjem možnosti sprem-

ljanja in regulacije procesa kontinuiranega ulivanja smo z letom 1991 začeli razvijati naslednje modele in računalniške sisteme:

- MODEL PRENOSA TOPLOTE IN SNOVI KONTINUIRANEGA ULIVANJA
- MODEL PRENOSA SNOVI, TOPLOTE, GIBALNE KOLIČINE IN SESTAVIN KONTINUIRANEGA ULIVANJA
- MODEL NAPETOSTI IN DEFORMACIJ KONTINUIRANEGA ULIVANJA
- SISTEM ZA RAČUNALNIŠKO BELEŽENJE PARAMETROV KONTINUIRANEGA ULIVANJA
- SISTEM ZA RAČUNALNIŠKO PRIKAZOVANJE PARAMETROV KONTINUIRANEGA ULIVANJA
- SISTEM ZA STATISTIČNO OBDELAVO BELEŽENIH VREDNOSTI PROCESNIH PARAMETROV KONTINUIRANEGA ULIVANJA
- SISTEM ZA REGULACIJO NAPRAVE ZA KONTINUIRANO ULIVANJE

Od razvoja naštetih modelov in sistemov si obetamo naslednje rezultate:

- ZAGOTOVITEV KVALITETE IN OSTALIH ZAHTEV KUPCEV: Kvaliteta kontinuiranega ulitka je funkcija željene sestave taline oziroma čistosti taline, notranje in zunanje razpokanosti proizvoda, makrosegregacije, poroznosti, željenih dimenzij proizvoda. Natančno določena optimalna porazdelitev temperatur ter hitrosti po ingotu med ulivanjem v odvisnosti od časa sta osnovni količini, katerih nadzor zagotavlja optimalno stalno kvaliteto.
- RAZVOJ NOVIH MATERIALOV: Simulacija procesov taljenja in strjevanja je osnovni element razvoja novih materialov ali tehnik ulivanja. Stroški simulacije procesa ulivanja novega materiala so zanemarljivi v primerjavi s stroški tipično nekaj deset ponesrečenih poskusov na

industrijski napravi in najrazličnejšimi nepredvidljivimi ogrožanji v tej zvezi.

- **IZOGIBANJE NAPAČNEMU DELOVANJU NAPRAVE:** Iz modelov procesa je mogoče razbrati katera področja procesnih parametrov niso primerna.
- **POJASNJEVANJE NAPAČNEGA DELOVANJA LIVNE NAPRAVE:** Iz modelov procesa je mogoče identificirati neuskkljene procesne parametre.
- **ZMANJŠANJE PORABE ENERGIJE NA ENOTO PROZVODA:** Izboljšana regulacija livne naprave in z njo kakovost izdelka pomeni odpravo porabe energije, ki je posledica ponovnega pretaljevanja, in zmanjšanje porabe energije pri najrazličnejših procesih po ulivanju.
- **USTREZANJE ČEDALJE STROŽJIM EKOLOŠKIM STANDARDOM:** Zaradi boljše izkoriščene energije se bo zmanjšala obremenjenost okolja.
- **POVEČANJE RAZPOLOŽLJIVOSTI LIVNE NAPRAVE:** Z izračunom položaja medfaznega roba v odvisnosti od sestave zlitine neposredno preprečimo kombinacijo obratovalnih parametrov livne naprave, ki povzroči prodor. Tipični časi sanacije prodora so tudi do dva tedna.
- **POVEČANJE VARNOSTI LIVNE NAPRAVE:** Preprečitev prodorov in optimalno krmiljenje procesnih spremenljivk z alarmiranjem preseganja njihovih mejnih vrednosti in avtomatično zasilno ustavitvijo naprave bistveno zmanjšajo tveganje delavcev.
- **IZOBRAŽEVANJE OPERATERJEV LIVNIH NAPRAV:** Na podlagi simulatorja procesa je mogoče preprosto izobraziti in izpopolniti znanje vseh, ki so kakorkoli povezani s procesom.
- **MOŽNOST ANALITIČNE OCENE KARAKTERISTIK MOREBITNIH NOVIH INVESTICIJ V LIVNE NAPRAVE:** Glede na modularnost razvitih simulacijskih modulov procesa kontinuiranega ulivanja bodo sorazmerno preprosto možne analitične strokovne ocene morebitnih novih investicij v opremo livnih naprav.

Ob koncu leta 1993 je projekt<sup>2,3,4,5</sup> približno na pol poti. Nekateri našti modeli in sistemi so že v celoti razviti<sup>6</sup> in tudi že uporabljani v proizvodnji. Eden izmed njih, model prenosa toplote in snovi, je opisan v tem prispevku. Na podlagi modela prenosa toplote in snovi razumemo temperaturno polje kontinuirano ulitega ingota v odvisnosti od procesnih parametrov ulivanja. Ta model prav tako predstavlja osnovo sistema za regulacijo naprave za kontinuirano ulivanje.

Realističen model<sup>7</sup> lahko zgradimo samo na osnovi medsebojnih interakcij med fizikalnimi predpostavkami modela, meritvami v laboratoriju ter verifikacijo modela na industrijski napravi.

### 3 Opis modela toplote in snovi livne naprave

**Fizikalni model** prenosa toplote in snovi livne naprave temelji na fizikalnem zakonu klasične ohranitve mase, na Newtonovih zakonih in klasičnih zakonih termodinamike. Fizikalni koncept temelji na mehaniki kontinuuma. Dvo fazni trdno tekoči kontinuum je popisan na osnovi teorije idealne mešanice<sup>8</sup> trdne in tekoče faze. Uporabljani sta enačbi ohranitve mase in energije mešanice. Privzet je nestisljiv kontinuum in Fourierjev konstitutivni zakon za toplotni tok.

**Matematični model** temelji na enačbah ohranitve energije in mase v Lagrangeovem opazovalnem sistemu. Uteženi sta z

Greenovo funkcijo Laplaceove enačbe preko prostora in časovnega intervala. Preoblikovani sta na podlagi Kirchhoffove transformacije in Greenovih izrekov<sup>9</sup>.

**Rešitveni postopek** temelji na dualni robno integralni metodi<sup>10</sup>. Razvit je v osni simetriji in v treh dimenzijah. Ker obravnavamo več različnih livnih naprav je računalniški program zasnovan v modularni obliki. Model specifičnega ulivanja<sup>11</sup> sestavimo s specifično izbiro geometrijskih modulov, modulov prevoda toplote, modulov snovnih lastnosti, modulov robnih pogojev in modulov ulivanja.

**Geometrijski moduli:** Na izbiro imamo tridimenzionalno in osnosimetrično verzijo diskretnega aproksimativnega numeričnega rešitvenega postopka.

**Moduli prevoda toplote:** Prevod toplote v osni smeri (smeri ulivanja) lahko upoštevamo ali zanemarimo. V primeru polkontinuiranega ulivanja aluminijevih zlitin je privzet prevod toplote v smeri pravokotno in vzporedno na pomikanje ingota, v primeru kontinuiranega ulivanja jekel pa prevoda toplote samo v smeri pravokotno na pomikanje ingota.

**Moduli snovnih lastnosti:** Moduli snovnih lastnosti zajemajo solidus in likvidus temperaturo (zlitine), temperaturo tališča (čiste snovi), specifično talilno toploto, ter temperaturno odvisne: gostoto, specifično toploto, toplotno prevodnost in deleža faz.

**Moduli robnih pogojev:** Na zgornjem robu ingota je upoštevan Dirichletov robni pogoj za prevod toplote, ki enači temperaturo zgornjega roba ingota s temperaturo ulivanja. Za prenos snovi je privzet advektivni robni pogoj, ki enači hitrost gornjega roba ingota s hitrostjo ulivanja. Na spodnjem robu ingota je privzet Neumannov robni pogoj toplotne izoliranosti za prevod toplote, za prenos snovi pa zaradi privzete nestisljivosti enak robni pogoj kot na zgornjem robu. Na stranskih robovih ingota so na voljo moduli robnih pogojev livne naprave ACRONI Jesenice ali IMPOI Slovenska Bistrica. Podrobna opisa teh dveh livnih naprav sta v dokumentih<sup>12,13,14,15</sup>.

#### 3.1 Robni pogoji ohlajanja livne naprave ACRONI

Ohlajanje bram livne naprave Jeklarne 2 ACRONI Jesenice poteka na dolžini 21.845[m], od tega je geometrija prvih 16.831[m] krožni lok s polmerom 10.500[m], ki se začneja vertikalno, konča horizontalno, izteka pa z ravnim delom. Bramo, ki je lahko široka od 0.800 - 1.600[m], debela pa bodisi 0.160, 0.200 ali 0.250[m], vodi 2×73 valjčnic petih različnih tipov. Ohlajanje ingota je izvedeno na podlagi zaprtega sistema ohlajanja štirih plošč kokile, nekaterih valjčnic ter sistema 187 prh, sklopljenih v 12 pod-sklopov. Vzdolžni položaj sekundarega hladilnega sistema začneja med presledkom spodnjega roba kokile in prvo valjčnico ter končuje med presledkom šestdesete in enainšestdesete valjčnice.

**Moduli ohlajanja ingota** livne naprave ACRONI Jesenice so razdeljeni na modul ohlajanja v kokili - primarno ohlajanje in module ohlajanja v področju valjčnic - sekundarno ohlajanje. Primarno ohlajanje livne naprave Jesenice je izvedeno na podlagi pravokotne kokile, ki ima neodvisno nastavljiv pretok vseh štirih stranic (notranje, zunanje, leve in desne). Regulacija primarnega ohlajanja obsega za vsako izmed štirih strani kokile ročno nastavljiv ventil. Instrumentacija pri-

marnega ohlajanja obsega kazalčni instrument in pisalo za pretok vsake izmed štirih strani kokile ter za razliko izstopna-vstopna temperatura primarnega hladila. Pri preveliki razliki izstopna-vstopna temperatura primarnega hladila se sproži alarm. Prhe vseh sekundarnih hladilnih podsistemov razen drugega prhajo na spodnjo ali zgornjo stran ingota med valjčnicami. Razporejene so lahko po štiri, tri, dve ali ena v vrsti. Prhe drugega sekundarnega hladilnega podsistema prhajo na bočni strani ingota. Regulacija sekundarnega ohlajanja obsega za vsakega izmed dvanajst hladilnih podsistemov ročno nastavljen ventil. Instrumentacija sekundarnega ohlajanja obsega za vsakega izmed dvanajstih hladilnih podsistemov kazalčni prikaz padca tlaka in kazalčni prikaz in pisalo za prikaz pretoka. V primeru nizkega pretoka ali tlaka se za vsakega izmed dvanajstih hladilnih podsistemov sproži alarm. Proizvajalec je predpisal številne programe sekundarnega ohlajanja v odvisnosti od dimenzij in sestave izdelka. Vsi so vključeni v model.

**Moduli ohlajanja kokile:** V področju primarnega ohlajanja lahko identificiramo tri mehanizme prenosa toplote: prestop toplote z ingota na kokilo, prevod toplote v kokili, prestop toplote s kokile na hladilo.

V ustaljenih razmerah lahko iz temperaturne razlike med vstopno in izstopno primarno hladilno vodo ocenimo povprečni toplotni tok in povprečno odvedeno moč kokile. Privzeta je naslednja korelacija za popis toplotnega toka v kokili

$$F = C_1 - C_2 \sqrt{Z/V}, \quad (1)$$

kjer  $F$  predstavlja toplotni tok v  $[W/m^2]$ ,  $Z$  razdaljo v  $[m]$  od gladine taline v smeri ulivanja,  $V$  hitrost ulivanja v  $[m/s]$ ,  $C_1$  in  $C_2$  pa sta empirična parametra<sup>16</sup>. Privzeta korelacija ima eno-dimenzionalno osno obliko. V prihodnje je bo na podlagi verifikacijskega postopka potrebno dograditi in vključiti vplive livnega praška, sestave ulivanca in vibracij kokile. Tipični toplotni tok v kokili livne naprave ACRONI Jesenice se giblje od 1-10  $[MW/m^2]$ .

**Moduli sekundarnega ohlajanja:** V področju sekundarnega ohlajanja lahko identificiramo šest mehanizmov prestopa toplote z ingota na okolico: neposreden stik z valjčnicami, neposreden stik s pršečo vodo, neposreden stik z odtekačo vodo, neposreden stik z zastojno vodo, neposreden stik z vodno paro, sevanje. Robne pogoje v zvezi z ohranitvijo energije pri procesu kontinuiranega ulivanja zapišemo v naslednji splošni Robinovi obliki

$$F = h[T - T_r], \quad (2)$$

kjer  $T$  predstavlja temperaturo površine ingota,  $T_r$  temperaturo okolice, oboje v  $[K]$ . Koefficient toplotne prestopnosti  $h$  v  $[W/mK]$  je sestavljen iz konvektivnega dela  $h_{con}$ , konduktivnega dela  $h_{con}$  in radiacijskega dela  $h_{rad}$

$$h = h_{con} + h_{con} + h_{rad} \quad (3)$$

Konvektivni del koeficienta toplotne prestopnosti zaradi pršeče vode v  $[W / m^2 K]$  je modeliran na podlagi korelacije<sup>17</sup>

$$h_{con} = C_3 J^{C_4}, \quad (4)$$

kjer  $J$  predstavlja površinski tok prh v  $[kg/m^2]$ ,  $C_3$  in  $C_4$  pa empirična parametra. Konvektivni del koeficienta toplotne prestopnosti zaradi stika z odtekačo vodo, zastojno vodo in vodno paro trenutno še ni upoštevan. Kontaktni del koeficienta toplotne prestopnosti je v prvem približku modeliran na podlagi tipičnih vrednosti toplotnega toka zaradi prestopa toplote na valjčnice,

$$h_{cw} = C_5 (T - T_r)^{-1}, \quad (5)$$

kjer je tipična vrednost<sup>18</sup> empirične konstante  $C_5$  za tipični premer valjčnice  $50000 [W/m^2]$ . Radiacijski del koeficienta toplotne prevodnosti je modeliran s Stefanovim zakonom

$$h_{rad} = C_{em} C_{St} [T + T_r] [T^2 + T_r^2], \quad (6)$$

kjer je  $C_{em}$  emisivnost (za jekla okoli 0.8-0.9) in  $C_{St}$  Stefanova konstanta.

### 3.2 Robni pogoji ohlajanja livne naprave IMPOL

Ohlajanje ingota je v vertikalni polkontinuirni napravi IMPOL Slovenska Bistrica izvedeno na podlagi brizganja hladilne vode na 0.09[m] visoko kokilo, v kateri je vzdrževan nivo taline tipično 0.03[m] od zgornjega roba. Dimenzije kokil so lahko pravokotne (od 0.7[m]×0.32[m] do 1.3[m]×320[m]) ali okrogle (premer od 0.155[m] do 0.225[m]). Voda nato prosto obteka ingot do nivoja hladilne vode v livnem kanalu. Oddaljenost nivoja hladilne vode v livnem kanalu je lahko najmanj 1.5[m] in največ 7.0[m] od zgornjega roba kokile. Regulacija ohlajanja obsega nastavitve volumnskega toka skozi eno vodno komoro in nastavitve nivoja hladilne vode v livnem jašku. Instrumentacija primarnega ohlajanja obsega merjenje pretoka in temperature hladilne vode ob vstopu v vodno komoro. Pretok hladilne vode v eno vodno komoro je v odvisnosti od formata in kvalitete ulivanca ter hitrosti ulivanja nastavljen na vrednost od 0.033 do 0.044  $[m^3/s]$ . Vstopna temperatura hladilne vode se giblje med 288 in 298  $[K]$ .

**Moduli ohlajanja ingota** livne naprave IMPOL Slovenska Bistrica so razdeljeni na modul ohlajanja v kokili, na module ohlajanja v področju turbulentnega filmskega obtekanja vode in na modul ohlajanja s stoječo vodo v livnem kanalu.

**Moduli ohlajanja kokile:** Tipični toplotni tok<sup>19</sup> klasične kokile livne naprave IMPOL Slovenska Bistrica se giblje od 300 do 900  $[kW/m^2]$ . Poudariti velja, da se toplotni tokovi pri Hot-Top načinu ulivanja (TALUM) lahko precej razlikujejo od teh vrednosti. V področju primarnega ohlajanja lahko identificiramo tri mehanizme prenosa toplote: prestop toplote z ingota na kokilo, prevod toplote v kokili, prestop toplote s kokile na hladilo. Prestop toplote z ingota na kokilo je specifičen za vsak tip kokile in ga je v splošnem potrebno izmeriti. Meritve lahko opravimo na neposreden način z vgradnjo termočlenov v kokilo ali na posreden način z meritvijo temperatur v ulivancu oziroma oblike medfaznega roba (čista snov) ali medfaznega območja (zlitina). Koefficient toplotne prestopnosti z ingota na kokilo je pri danem projektu kokile funkcija nivoja taline, hitrosti ulivanja, temperature, kvalitete in formata ulivanca ter pretoka in temperature hladilne vode.

**Moduli ohlajanja področja turbulentnega filmskega obtekanja:** V področju turbulentnega filmskega obtekanja ingota s hladilno vodo imamo lahko naslednje režime prestopa toplote: prisiljeno konvekcijo, podhlajeno vrenje in filmsko vrenje. Koeficient toplotne prestopnosti  $h$  v [W / mK] je sestavljen iz konvektivnega dela  $h_{conv}$  in radiacijskega dela  $h_{rad}$ :

$$h = h_{conv} + h_{rad} \quad (7)$$

Pri tipičnih pogojih kontinuiranega ulivanja obstaja<sup>20</sup> režim enofazne prisiljene konvekcije pri površinskih temperaturah ingota  $T < 373[K]$ , režim podhlajenega vrenja pri temperaturah ingota  $373 \leq T < 573[K]$  in režim filmskega vrenja pri temperaturah  $T \geq 573[K]$ . *Konvektivni del* koeficienta toplotne prevodnosti v področju režima enofazne prisiljene konvekcije je enak<sup>21</sup>

$$h_{conv} = [-C_1 + C_2 T_{mean}] Q^{1/3}, \quad (8)$$

pri čemer sta  $C_1$  in  $C_2$  pozitivni konstanti,

$$T_{mean} = 0.5 [T + T_r], \quad Q = Q_{vol}/O, \quad (9)$$

kjer  $Q_{vol}$  predstavlja volumski pretok v [m<sup>3</sup>/s],  $O$  pa obseg droga ali brame v [m]. *Konvektivni del* koeficienta toplotne prevodnosti v področju režima podhlajenega vrenja je

$$h_{conv} = [-C_1 + C_2 T_{mean}] Q^{1/3} + C_3 \frac{(T - T_{sw})^3}{T - T_r}, \quad (10)$$

kjer  $C_3$  predstavlja pozitivno konstanto. *Konvektivni del* koeficienta toplotne prevodnosti v področju režima filmskega vrenja je enak

$$h_{conv} = C_4 (T - T_r)^{-1}, \quad (11)$$

kjer  $C_4$  predstavlja pozitivno konstanto. *Radiacijski del* koeficienta toplotne prevodnosti je modeliran s Stefanovim zakonom in s tipično vrednostjo emisivnosti aluminijevih zlitin 0.05. V področju *stika ingota s stoječo hladilno vodo* v livnem kanalu imamo predvsem mehanizem prestopa toplote z naravno konvekcijo. Ustrezna empirična korelacija<sup>22</sup> je oblike

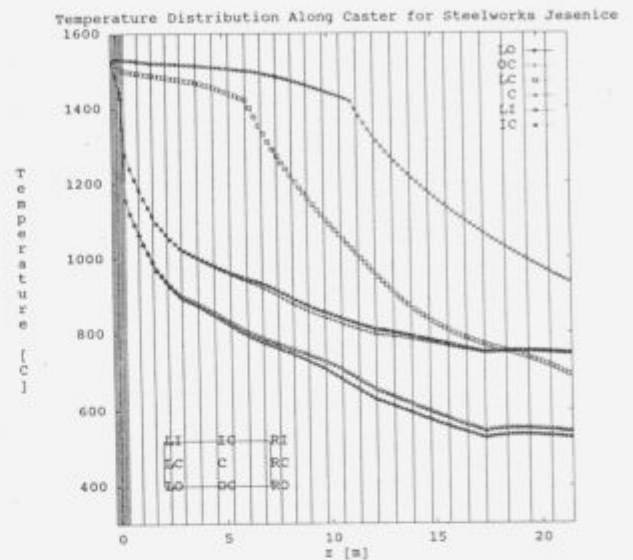
$$h_{conv} = C_5 (k \rho c)^{C_6} \exp\left(C_7 \frac{T - T_{sw}}{T_r - T_{sw}}\right) + C_8, \quad (12)$$

kjer so  $C_5$ ,  $C_6$ ,  $C_7$  in  $C_8$  empirični parametri.

#### 4 Verifikacija modelov in zaključki

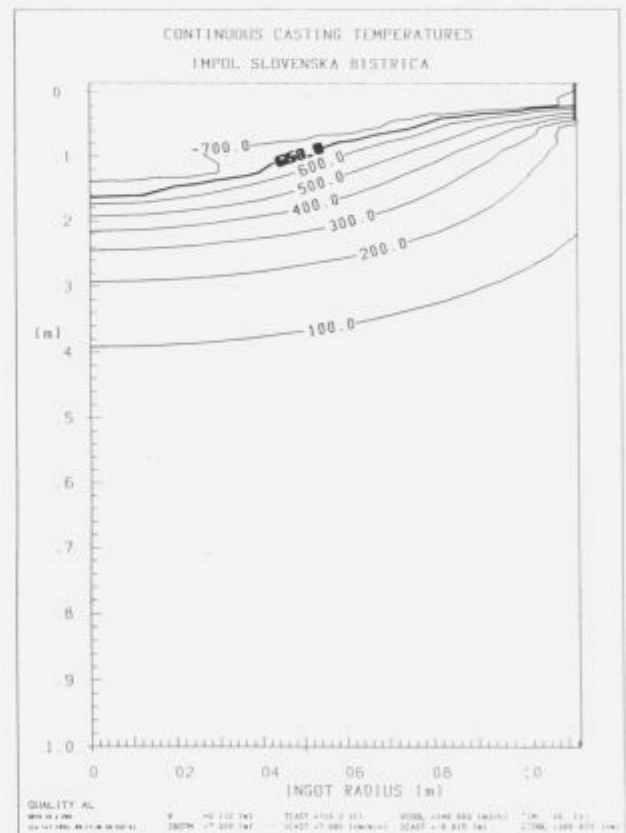
Modela za ACRONI Jesenice in IMPOL Slovenska Bistrica sta bila izpopolnjena in preliminarno verificirana na podlagi inženirske ocene smiselnosti rezultatov in na podlagi primerjave z redkimi eksperimentalnimi podatki. V prihodnje bo potrebno model natančno umeriti na livno napravo. Zato so potrebne naslednje akcije: dopolnitev instrumentacije kot je opisana v <sup>12,14</sup>, ter praktična implementacija razvitega sistema za zbiranje, shranjevanje in prikazovanje procesnih parametrov. V primeru IMPOL Slovenska bistrica bomo morali

opraviti meritve toplotnega toka z ingota na kokilo in meritve toplotnega toka z ingota na slepo dno. Verifikacijski postopek za ACRONI bo temeljil na izkušnjah, opisanih v <sup>20</sup>.



Slika 1: Tipična izračunana temperaturna porazdelitev v ingotu naprave za kontinuirano ulivanje ACRONI Jesenice.

Figure 1: Typical calculated ingot temperature distribution of ACRONI Jesenice continuous caster.



Slika 2: Tipična izračunana temperaturna porazdelitev v ingotu naprave za polkontinuirano ulivanje IMPOL Slovenska Bistrica.

Figure 2: Typical calculated ingot temperature distribution of IMPOL Slovenska Bistrica semicontinuous caster.

Uporabniki si bodo na podlagi razvitih modelov in senzorsko-regulacijskih dopolnitev livnih naprav lahko odgovorili na primer na naslednja vprašanja: Kje je ingot popolnoma strjen? Kakšno mikrostrukturo pričakujemo? Kje so največji toplotni tokovi? Kje so največje koncentracije napetosti? Kaj se zgodi, če hočemo povečati hitrost ulivanja? Kakšen je stik med kokilo in ingotom? Ali je kokila premalo, dovolj, ali preveč konična? Kaj moramo storiti, če hočemo doseči 10% hitrejše ulivanje? Kaj moramo storiti, če hočemo odpraviti ali zmanjšati razpokanost? Kaj moramo storiti, če hočemo odpraviti ali zmanjšati razliko med predvideno in dejansko obliko ingota? Kaj je narobe z neko strategijo ohlajanja? S katerimi procesnimi parametri moramo ulivati nov material?

## 5 Zahvala

Avtorja se zahvaljujeta MZT, ACRONI Jesenice, IMPOL Slovenska Bistrica, Mariborski Livarni Maribor in TALUM Kidričevo za podporo v okviru predkonkurenčnega projekta "Prenos toplote in snovi pri kontinuiranem ulivanju".

## 6 Literatura

- <sup>1</sup> J.K.Brimacombe, I.V.Samarasekera, Fundamental Analysis of the Continuous Casting Process for Quality Improvements, R.Trivedi, J.A.Sekhar, J.Mazumdar, (eds.), *Principles of Solidification and Materials Processing*, Trans Tech Publications, Switzerland, 1990.
- <sup>2</sup> B.Šarler, Prenos toplote in snovi pri kontinuiranem ulivanju, Prvo fazno poročilo, 01.09.1991.
- <sup>3</sup> B.Šarler, Prenos toplote in snovi pri kontinuiranem ulivanju, Drugo fazno poročilo, 15.02.1992.
- <sup>4</sup> B.Šarler, Prenos toplote in snovi pri kontinuiranem ulivanju, Tretje fazno poročilo, 31.12.1992.
- <sup>5</sup> B.Šarler, Prenos toplote in snovi pri kontinuiranem ulivanju, Četrto fazno poročilo, 30.06.1993.
- <sup>6</sup> I.Šalamun, A.Stritar, B.Šarler, Spremljanje parametrov kontinuiranega ulivanja na osebem računalniku, Kovine, zlitine, tehnologije, Vol.27, (1993), pp.171-174.
- <sup>7</sup> B.Šarler, A.Križman, D.Križman, A.Košir, Posodobitve procesa kontinuiranega ulivanja na podlagi eksperimentalno potrjenega matematičnega modeliranja, Kovine, zlitine, tehnologije, Vol.26, (1992), pp.257.
- <sup>8</sup> W.D.Bennon, F.P.Incropera, A continuum model for momentum, heat and species transport in binary solid-liquid phase change systems - I. Model formulation, *International Journal for Heat and Mass Transfer*, Vol.30, (1987), pp.2161-2170.
- <sup>9</sup> B.Šarler, B.Mavko, G.Kuhn, Formulation of convection-conduction energy transport in multiconstituent solid-liquid phase change systems for BEM solution techniques, *International Journal for Engineering Analysis by Boundary Elements*, Vol.11, (1993), pp.109-117.
- <sup>10</sup> B.Šarler, A.Košir, Solution of melting and solidification problems by the dual reciprocity boundary element method, *Numerical Methods in Thermal Problems - VIII*, Editors: R.W.Lewis, K.Morgan, O.C.Zienkiewicz, Wiley Series in Numerical Methods in Engineering, Wiley, New York, (1993), pp.139-150.
- <sup>11</sup> J.R.Böhmer, Ein modulares PC-Modell zur Berechnung von Erstarrung, Wärmeabfuhr und Materialbelastung beim Stranggiessen von Metall-Rundformaten, *Z.Metallkd.*, Vol.84, (1993).
- <sup>12</sup> B.Šarler, B.Mavko, A.Stritar, A.Košir, *Prenos toplote in snovi pri kontinuiranem ulivanju, Faza 1: IMPOL Slovenska Bistrica*, IJS-DP-6390, Februar 1992. (poslovna tajna).
- <sup>13</sup> B.Šarler, A.Košir, B.Mavko, A.Stritar, I.Šalamun, *Prenos toplote in snovi pri kontinuiranem ulivanju, Faza 2: IMPOL Slovenska Bistrica*, IJS-DP-6749, Junij 1993. (poslovna tajna).
- <sup>14</sup> B.Šarler, B.Mavko, A.Stritar, A.Košir, *Prenos toplote in snovi pri kontinuiranem ulivanju, Faza 1: Železarna Jesenice*, IJS-DP-6749, Februar 1992. (poslovna tajna).
- <sup>15</sup> B.Šarler, A.Košir, B.Mavko, A.Stritar, I.Šalamun, *Prenos toplote in snovi pri kontinuiranem ulivanju, Faza 2: Železarna Jesenice*, IJS-DP-6748, Junij 1993. (poslovna tajna).
- <sup>16</sup> J.O.Kristiansson, E.H.Zetterlund, Thermal stresses and strains in the solidifying shell with the primary cooling zone during continuous casting, *Numerical Methods in Industrial Forming Processes*, Swansea, (1982), pp.173-182.
- <sup>17</sup> L.Bolle, J.C.Moureau, Chapter 1: Spray Cooling of Hot Surfaces, *Multiphase Science and Technology*, Editors: G.F.Hewitt, J.M.Delhaye, N.Zuber, McGraw-Hill, New York, (1982), pp.1-97.
- <sup>18</sup> H.Schrewe, *Stranggiessen von Stahl*, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, (1987).
- <sup>19</sup> D.A.Peel, A.E.Pengelly, S.Pilkington, Pilot plant studies of heat transfer solidification and resultant structure of continuously cast aluminium, *TMS Paper No.A70-49*, (1971).
- <sup>20</sup> D.C.Weckman, P.Niessen, A Numerical Simulation of the D.C.Continuous Casting Process Including Nucleate Boiling Heat Transfer, *Metall.Trans.*, Vol.13B, (1982), pp.593-602.
- <sup>21</sup> W.M.Rohsenow, J.P.Hartnett, E.J.Ganić, *Handbook of Heat Transfer Applications*, McGraw-Hill, (1976).
- <sup>22</sup> B.Prinz, W.Wunder, Kriterien für die Sekundärkühlung beim Stranggiessen am Beispiel hochnickelhaltiger Werkstoffe, E.Lossack, (ed.), *Stranggiessen, Schmelzen-Giessen-Überwachen*, Informationsgesellschaft verlag, (1986), pp.227-243.
- <sup>23</sup> S.Louhenkilpi, *Continuous Casting of Steel 1984-1989*, Tekes, Finland, (1993).