Ugotavljanje začetnega temperaturnega stanja vročih plošč pri zalaganju v potisno peč

T. Kolenko*1, M. Debelak*2, B. Glogovac*2

UDK: 536.55:536.21:681.3.06:669-147
ASM/SLA: F21b, D9q, S16b, U4k, P11m

Raziskan je problem ugotavljanja začetnega temperaturnega stanja pri toplem zalaganju plošč v potisno peč. Izhodišče raziskave predstavlja matematični model kontinuirnega ulivanja plošč, ki je predhodni proces ogrevanju plošč v potisni peči. Upoštevani so vsi robni pogoji, ki vplivajo na ohlajanje plošč, od začetka ulivanja do transporta plošč do peči. Rezultati raziskave so prikazani v diagramih, ki prikazujejo temperaturo v sredini in na površju plošč v odvisnosti od časa.

UVOD

Za vodenje ali analizo procesnih sistemov je potrebno skrbno definirati posamezne faze procesa, začetna stanja v sistemu in druge robne pogoje. Pri ogrevanju vložka v potisni peči na temperaturo tople predelave predstavlja poseben problem določitev začetnega temperaturnega stanja vložka, ki vsebuje določeno entalpijo kot posledico predhodnega procesa. V pogojih normalnega obratovanja ni mogoče direktno z meritvami določiti začetne temperaturne porazdelitve v plošči pri zalaganju v vročem stanju. Tudi bi to bilo nesmotrno, ker začetno temperaturno stanje ni enolično, ampak se spreminja odvisno od obratovalnih pogojev. Zato smo določitev začetnega temperaturnega stanja v vročih založenih ploščah, ulitih na napravi za kontinuirno ulivanje, osnovali na poznavanju osnovnih zakonitosti procesa kontinuirnega ulivanja plošč. Podoben problem z zahtevnimi meritvami v zvezi s tehniko transporta vročih plošč je obdelan v literaturi.[1]

2. SPOZNAVANJE S PROCESOM KONTINUIRNEGA ULIVANJA

Po svoji naravi je kontinuirno ulivanje jekla predvsem proces odvajanja toplote. Pretvorba staljenega jekla v strjeno obliko polizdelka zahteva odvajanje:

— entalpije, ki jo ima talina zaradi višje temperature, kot je temperatura likvidusa;

— talilne toplote na fronti strjevanja, ko se talina transformira v strjeno jeklo;

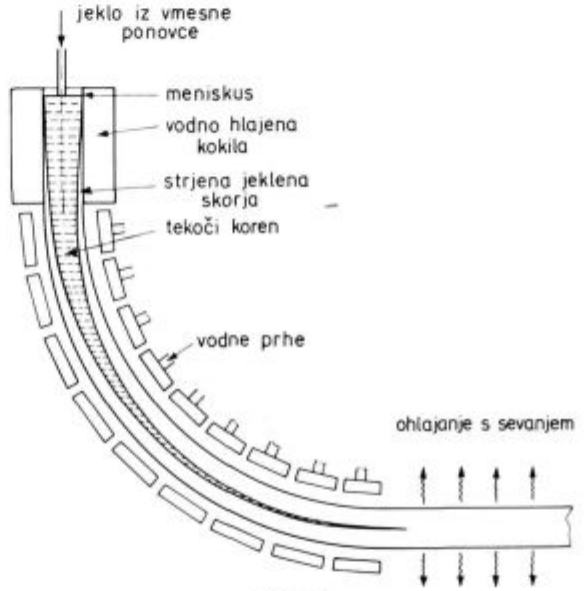
— entalpije strjene skorje.

Te toplotne tokove odvedemo s kombinacijo mehanizmov prenosa toplote:[2]

— konvekcije v tekočem korenu, ki nastane zaradi vrtincev pri ulivanju taline iz vmesne ponovce v kokilo in vzgona;

— prevajanja toplote v smeri padanja temperaturnega gradienta v strjeni skorji od vroče fronte strjevanja proti hladnejšemu zunanjemu površju žile;

— zunanjega prenosa toplote s sevanjem, prevajanjem in konvekcijo v treh glavnih conah odvajanja toplote, ki so: kokila, prhe in podporni valji ter cona sevanja na okolico. Te cone so prikazane v **sliki 1**.



Slika 1.
Cone odvajanja toplote v napravi za kontinuirno ulivanje jekla

Fig. 1
Zones of heat removal in a continuous casting machine

Ker ima prenos toplote pomembno vlogo pri kontinuirnem ulivanju, je zaželeno, da procese prevajanja toplote razumemo tudi kvantitativno, kar nam omogoča, da predvidimo profil fronte strjevanja in porazdelitev temperatur kot funkcijo spremenljivk ulivanja.

Matematična formulacija temelji na osnovni enačbi prevajanja toplote v nestacionarnem temperaturnem polju, na obratovalnih podatkih o hladilni vodi, na empiričnih podatkih, ki opisujejo zapletene procese odvajanja toplote na površju žile v hladilnih conah, in na zakonu o sevanju trdnih teles.

S stališča matematične simulacije je smotrno privzeti, da se toplota prevaja samo v prečni smeri (x, y) in da ni prevajanja v osni smeri. Tako lahko opazujemo presek žile, ki ima dvodimenzionalni značaj. Med potovanjem od meniskusa do mesta rezanja se presek ohlaja pod različnimi robnimi pogoji, ki vladajo v kokili, pod prhami in na izteku žile. Čas razdelimo na kratke časovne intervale in ker je hitrost ulivanja »v« konstantna, lahko izračunamo položaj preseka v osni smeri »z« ob vsakem povečanju časa »t« za »Δt«, $z = v \cdot t$, s tem pa tudi robne pogoje.

*1 Doc. dr. Tomaž Kolenko, docent FNT, VTOZD Montanistika, Aškerčeva 20, Ljubljana
*2 SŽ — Metalurški inštitut Ljubljana

**Originalno publicirano: ŽZB 25(1991)2
***Rokopis sprejet: februar 1991

Takšno gledanje na proces ohlajanja pa pomeni, da lahko problem ohlajanja žile obravnavamo kot dvodimenzionalni primer prevajanja toplote v nestacionarnem temperaturnem polju pri spreminjajočih se robnih pogojih, ki ga opišemo z en. (1):

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial \vartheta}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial \vartheta}{\partial y}\right)=\rho c_p\frac{\partial \vartheta}{\partial t} \qquad 1$$

Za rešitev en. (1) moramo določiti začetne in *robne* pogoje. Začetne pogoje dobimo z določitvijo temperaturne porazdelitve v meniskusu, ki je navadno enakomerna in enaka temperaturi ulivanja, ϑ_p:

$$0\le x\le X;\ 0\le y\le Y,\ \vartheta\ (x, y)=\vartheta_p \qquad 2$$

Robne pogoje na površju žile izpeljemo iz predpostavke o kontinuiteti toplotnega toka:

$$x=0,\ -\lambda\frac{\partial \vartheta}{\partial x}\bigg|_{x=0}=q_o \qquad 3$$

$$y=0,\ -\lambda\frac{\partial \vartheta}{\partial y}\bigg|_{y=o}=q_o \qquad 4$$

kjer je q_o toplotni tok na površju, značilen za vsako hladilno cono. Z besedami ti robni pogoji pomenijo, da je toplotni tok, ki prihaja iz notranjosti na površje, enak zunanjemu toplotnemu toku, ki ga moramo določiti empirično. Tako so potrebne meritve profila toplotnega toka v kokili v odvisnosti od hitrosti ulivanja, kvalitete jekla in tipa mazila. Podobno so potrebni eksperimenti za določitev toplotnega toka v prhah za različne tipe šob in njihovo razporeditev kot tudi za konfiguracijo podpornih valjev. Podatke o toplotnih tokovih izrazimo s toplotno prestopnostjo, ki je definirana z en. (5):

$$\alpha=\frac{q_o}{\Delta\vartheta} \qquad 5$$

kjer je $\Delta\vartheta$ temperaturna razlika med temperaturo površja žile in hladilnega sredstva. V coni hlajenja s sevanjem izrazimo q_o s Stefan-Boltzmannovim zakonom:

$$q_o=\alpha\,\varepsilon\,(T_o^4-T_a^4) \qquad 6$$

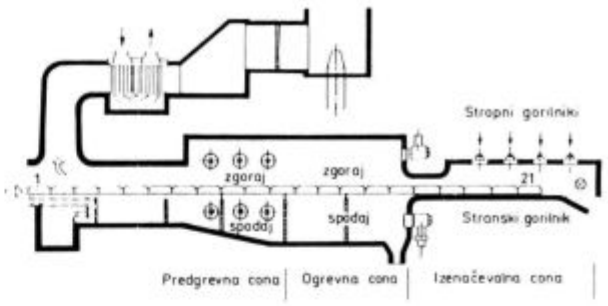
kjer je emisivnost površja žile 0.8.

V pričujoči raziskavi smo robne pogoje v kokili določili iz pretokov in temperaturnih narastkov vode. Toplotno prestopnost v coni ohlajanja pod prhami smo izračunali s kombinacijo meritev in simulacije ohlajanja z matematičnim modelom.

3. SPOZNAVANJE S PROCESOM OGREVANJA PLOŠČ V POTISNI PEČI

Tako kot prehaja žila pri kontinuiranem ulivanju skozi različne cone ohlajanja, tako tudi plošče v potisni peči potujejo skozi različne ogrevne cone v potisni peči kot prikazuje **slika 2**.

Proces ogrevanja plošč teče neprekinjeno. Ob vsakem pomiku se plošča premakne za razdaljo, ki je enaka širini plošče. Ni nujno, da so intervali zadrževanja plošče na posameznem mestu enaki, ker prihaja do zastojev na spremljajočih napravah. Tako tudi vsaka plošča ni v peči enako dolgo. Z modelom računamo temperaturni profil v plošči, povprečno temperaturo plošče in največjo temperaturno diferenco v plošči ter vodimo evidenco o času zadrževanja plošče na položajih v peči med dvema izvlačenjema in o temperaturi sten peči.

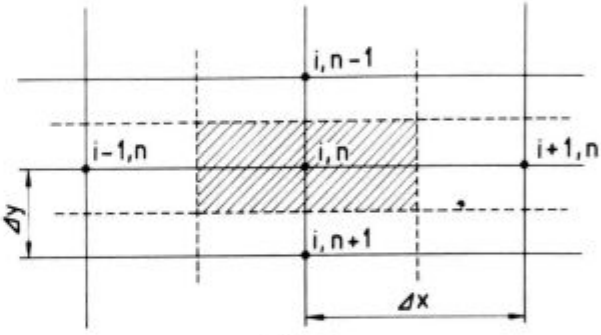


Slika 2.
Peč za kontinuirno ogrevanje jeklenih plošč

Fig. 2.
Continuous steel slab reheating furnace

4. PREVAJANJE TOPLOTE V PLOŠČI OBRAVNAVANO V DVEH DIMENZIJAH

Za prevajanje toplote v dveh dimenzijah v pravokotnem koordinatnem sistemu uporabimo numerično tehniko končnih diferenc. Naredimo energijsko bilanco za pravokotni element po **sliki 3**:



Slika 3.
Nomenklatura za dvodimenzionalno mrežo v notranjosti ploščatega telesa

Fig. 3.
Nomenclature for numerical solution of two-dimensional heat conduction inside a slab

Vsota toplotnih tokov v ali iz elementa je enaka povečanju ali zmanjšanju entalpije elementa. En. (7) predstavlja matematični zapis energijske bilance s končnimi diferencami.

$$\lambda\Delta y\frac{\vartheta^p_{i-1,n}-\vartheta^p_{i,n}}{\Delta x}+\lambda\Delta y\frac{\vartheta^p_{i+1,n}-\vartheta^p_{i,n}}{\Delta x}+$$

$$+\lambda\Delta x\frac{\vartheta^p_{i,n-1}-\vartheta^p_{i,n}}{\Delta y}+\lambda\Delta x\frac{\vartheta^p_{i,n+1}-\vartheta^p_{i,n}}{\Delta y}=$$

$$=\rho c_p\Delta x\Delta y\frac{\vartheta^{p+1}_{i,n}-\vartheta^p_{i,n}}{\Delta t} \qquad 7$$

Iz energijske bilance izrazimo enačbo za prevajanje toplote v nestacionarnem temperaturnem polju v dveh dimenzijah s končnimi diferencami:

$$\frac{\vartheta^p_{i+1,n}+\vartheta^p_{i-1,n}-2\vartheta^p_{i,n}}{\Delta x^2}+\frac{\vartheta^p_{i,n+1}+\vartheta^p_{i,n-1}-2\vartheta^p_{i,n}}{\Delta y^2}=$$

$$\frac{1}{a}\frac{\vartheta^{p+1}_{i,n}-\vartheta^p_{i,n}}{\Delta t} \qquad 8$$

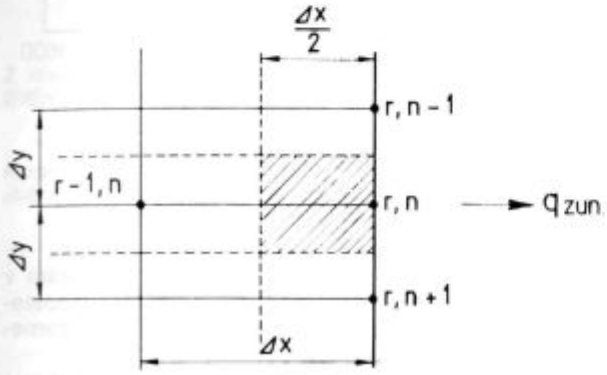
kjer je $a=\lambda/c\rho$.

Iz en. (8) izrazimo temperaturo mrežne točke v naslednjem časovnem intervalu s temperaturami te mrežne točke in sosednjih točk v trenutnem časovnem intervalu kot kaže en. (9). Indeks »i« pomeni koordinate mrežnih točk v smeri »x« indeks »n« pa koordinate točk v smeri »y«.

$$\vartheta^{p+1}_{i,n} = \frac{a\,\Delta t}{\Delta x\,\Delta y}\left(\frac{1}{q}\vartheta^{p}_{i+1,n} + \frac{1}{q}\vartheta^{p}_{i-1,n} + q\,\vartheta^{p}_{i,n+1} + q\,\vartheta^{p}_{i,n-1}\right) + \left[1 - \frac{2a\,\Delta t}{\Delta x\,\Delta y}\left(\frac{1}{q}+q\right)\right]\vartheta^{p}_{i,n} \qquad 9$$

$$q = \frac{\Delta x}{\Delta y}$$

Za površje plošče moramo narediti energijsko bilanco posebej po **sliki 4**:



Slika 4.
Vozli končnih diferenc za numerično rešitev dvodimenzionalnega prevajanja toplote na površju plošče

Fig. 4.
Finite-difference nodes for numerical solution of twodimensional heat conduction on the slab surface

$$\lambda\Delta y\,\frac{\vartheta^{p}_{r-1,n} - \vartheta^{p}_{r,n}}{\Delta x} + \lambda\,\frac{\Delta x}{2}\,\frac{\vartheta^{p}_{r,n-1} - \vartheta^{p}_{r,n}}{\Delta y} + \lambda\,\frac{\Delta x}{2}\,\frac{\vartheta^{p}_{r,n+1} - \vartheta^{p}_{r,n}}{\Delta y} + \Delta y\,q_{zun} = \rho c_p\,\frac{\Delta x}{2}\,\Delta y\,\frac{\vartheta^{p+1}_{r,n} - \vartheta^{p}_{r,n}}{\Delta t} \qquad 10$$

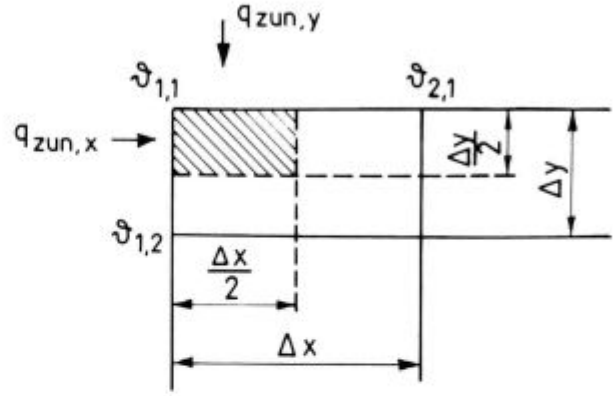
q_{zun} je toplotni tok, ki priteka (+) v točko (r, n) na površju iz okolice ali odteka (–) iz točke (r, n) v okolico. Izražen mora biti v W/m².

Iz en. (10) izrazimo temperaturo v točki na površju za naslednji časovni interval »p + 1« s temperaturo te točke, temperaturami sosednjih točk in toplotnim tokom, ki ga točka izmenjuje z okolico.

$$\vartheta^{p+1}_{r,n} = \frac{a\,\Delta t}{\Delta x\,\Delta y}\left\{2\,\frac{1}{q}\,\vartheta^{p}_{r-1,n} + q\,\vartheta^{p}_{r,n+1} + q\,\vartheta^{p}_{r,n-1} + \left[\frac{\Delta x\,\Delta y}{a\,\Delta t} - 2\left(\frac{1}{q}+q\right)\right]\vartheta^{p}_{r,n} + 2\,\frac{1}{\lambda}\,\Delta y\,q_{zun}\right\} \qquad 11$$

Za rob ploščatega telesa oziroma vogal glede na dvodimenzionalno predstavitev mreže točk po **sliki 5** prav tako naredimo energijsko bilanco:

$$\lambda\,\frac{\Delta x}{2}\,\frac{\vartheta^{p}_{1,2} - \vartheta^{p}_{1,1}}{\Delta y} + \lambda\,\frac{\Delta y}{2}\,\frac{\vartheta^{p}_{2,1} - \vartheta^{p}_{1,1}}{\Delta x} + \frac{\Delta y}{2}\,q_{zun,x} + \frac{\Delta x}{2}\,q_{zun,y} = \rho c\,\frac{\Delta x}{2}\,\frac{\Delta y}{2}\,\frac{\vartheta^{p+1}_{1,1} - \vartheta^{p}_{1,1}}{\Delta t} \qquad 12$$



Slika 5.
Vozli končnih diferenc za numerično rešitev dvodimenzionalnega prevajanja toplote na robu plošče

Fig. 5.
Finite-difference nodes for numerical solution of twodimensional heat conduction on the slab edge

Energijska bilanca po en. (12) je izdelana za ogrevanje robu. Če se toplota odvaja v okolico, potem je potrebno $q_{zun,x}$ in $q_{zun,y}$ upoštevati z negativnim predznakom.

$$\vartheta^{p+1}_{1,1} = \frac{2\,a\,\Delta t}{\Delta x\,\Delta y}\left\{q^{p}_{1,2} + \frac{1}{q}\,\vartheta^{p}_{2,1} + \left[\frac{\Delta x\,\Delta y}{2\,a\,\Delta t} - \left(\frac{1}{q}+q\right)\right]\vartheta^{p}_{1,1} \pm \frac{\Delta y}{\lambda}\,q_{zun,x} \pm \frac{\Delta x}{\lambda}\,q_{zun,y}\right\} \qquad 13$$

\+ velja za dovajanje toplotnega toka od zunaj
– velja za odvajanje toplotnega toka navzven

5. UPOŠTEVANJE SIMETRIČNEGA PREVAJANJA TOPLOTE V MODELU

Zaradi simetrije upoštevamo v modelu samo eno četrtino preseka, s čimer pridobimo precej računalniškega časa. Zato pa moramo dodatno nastaviti enačbe za temperature na oseh preseka plošče. Temperaturo točk, ki ležijo na polovici debeline (smer y) v smeri x, izračunamo iz en. (9), za katero velja, da je zaradi simetričnega temperaturnega polja $\vartheta^{p}_{i,my2+1} = \vartheta^{p}_{i,my2-1}$:

$$\vartheta^{p+1}_{i,n} = \frac{a\,\Delta t}{\Delta x\,\Delta y}\left(\frac{1}{q}\,\vartheta^{p}_{i+1,my2} + \frac{1}{q}\,\vartheta^{p}_{i-1,my2} + 2\,q\,\vartheta^{p}_{i,my2-1}\right) + \left[1 - \frac{2\,a\,\Delta t}{\Delta x\,\Delta y}\left(\frac{1}{q}+q\right)\right]\vartheta^{p}_{i,my2} \qquad 14$$

my 2 izračunamo: my div 2 + 1; število točk my v smeri y mora biti liho.

Temperaturo v točkah, ki ležijo v smeri y na polovici širine (smer x), izračunamo prav tako iz en. (9), za katero velja, da je zaradi simetričnega prevajanja toplote $\vartheta^{p}_{mx\,2+1,n} = \vartheta^{p}_{mx\,2-1,n}$:

$$\vartheta^{p+1}_{mx\,2,n} = \frac{a\,\Delta t}{\Delta x\,\Delta y}\left(2\,\frac{1}{q}\,\vartheta^{p}_{mx2-1,n} + q\,\vartheta^{p}_{mx2,n+1} + q\,\vartheta^{p}_{mx2,n-1}\right) + \left[1 - \frac{2\,a\,\Delta t}{\Delta x\,\Delta y}\left(\frac{1}{q}+q\right)\right]\vartheta^{p}_{mx2,n} \qquad 15$$

mx 2 izračunamo: mx div 2 + 1; število točk mx v smeri x mora biti liho.

Temperaturo v točki v sredini preseka izračunamo iz en. (9) z analognim premislekom ob upoštevanju ustreznih indeksov:

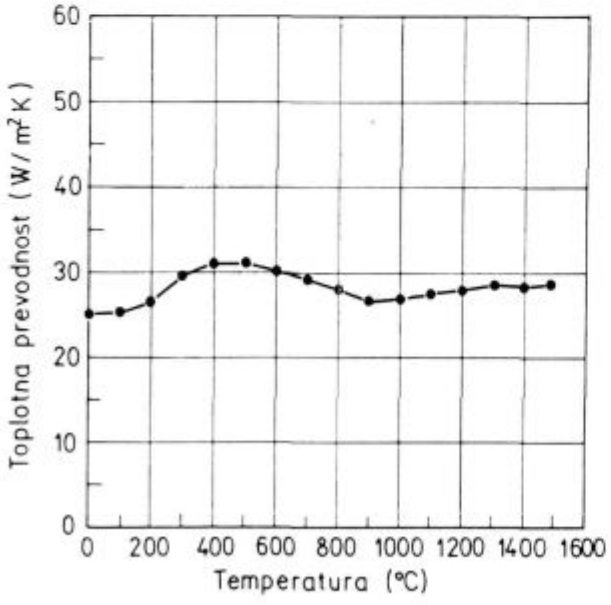
$$\vartheta^{p+1}_{mx\,2,\,my\,2} = \frac{a\,\Delta t}{\Delta x\,\Delta y}\left(2\,\frac{1}{q}\,\vartheta^{p}_{mx\,2-1,\,my\,2} + 2\,q\,\vartheta^{p}_{mx\,2,\,my\,2-1}\right) + \left[1 - \frac{2\,a\,\Delta t}{\Delta x\,\Delta y}\left(\frac{1}{q}+q\right)\right]\vartheta^{p}_{mx\,2,\,my\,2} \qquad 16$$

6. UPORABA MATEMATIČNEGA MODELA ZA UGOTOVITEV ZAČETNE TEMPERATURE PRI ZALAGANJU VROČIH PLOŠČ V POTISNO PEČ

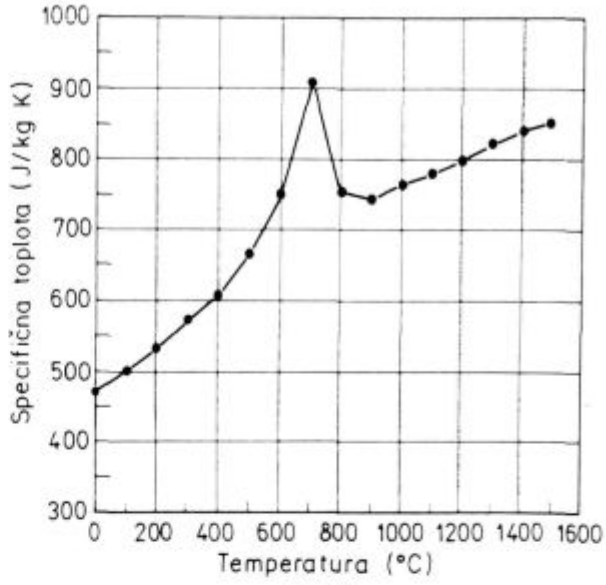
Pri kontinuirnem ulivanju vplivajo na strjevanje plošč številne procesne veličine:

— temperatura ulivanja jekla,
— kemijska sestava jekla in s tem njegova toplotna prevodnost, specifična toplota in talilna toplota,
— debelina in širina plošče,
— pretok in temperatura hladilne vode v kokili,
— značilnosti sekundarnega hlajenja: intenziteta in čas ohlajanja pod prhami ter čas ohlajanja s sevanjem.

Z modelom smo simulirali ulivanje 200 mm debelih in 1050 mm širokih plošč iz dinamo jekla s temperaturo ulivanja 1527° C, likvidus temperaturo 1507° C in solidus temperaturo 1486° C. Privzeli smo, da je meniskus taline v 700 mm visoki kokili 100 mm pod vrhom kokile. Pretok hladilne vode skozi kokilo za ohlajanje širine plošče je 2,700 m^3/h in za ohlajanje debeline plošče 0,350 m^3/h. V obeh primerih se voda ogreje za 6° C. Iz teh podatkov izračunamo povprečni odvedeni toplotni tok na m^2 s površja posebej preko širine in debeline plošče. Diagrami toplotne prevodnosti in specifične toplote so prikazani v **sliki 6 in 7**. Za izračun prevajanja toplote v talini privzamemo, da se temperature zaradi konvekcijski tokov hitro izenačijo po preseku. Zato vzamemo za toplotno prevodnost relativno visoko vrednost glede na diagram v **sliki 6**, in sicer 100 W/m^2K. Pri specifični toploti upoštevamo v področju strjevanja še talilno toploto. Privzamemo vrednost 7890 J/kg K.[1]



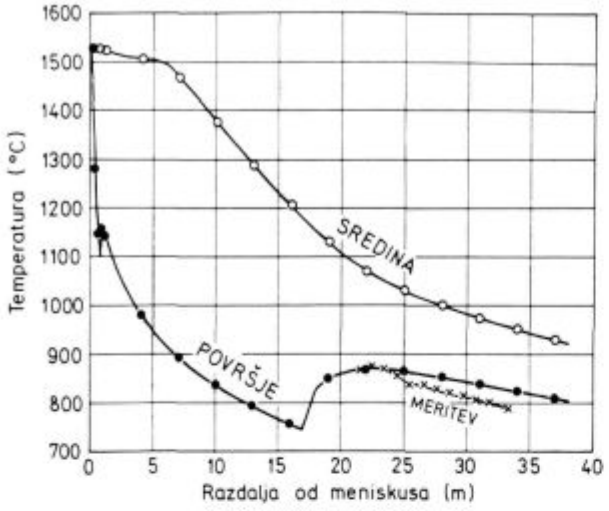
Slika 6.
Toplotna prevodnost dinamo jekla
Fig. 6.
Thermal conductivity of electrical steel



Slika 7.
Specifična toplota dinamo jekla
Fig. 7.
Specific heat of electrical steel

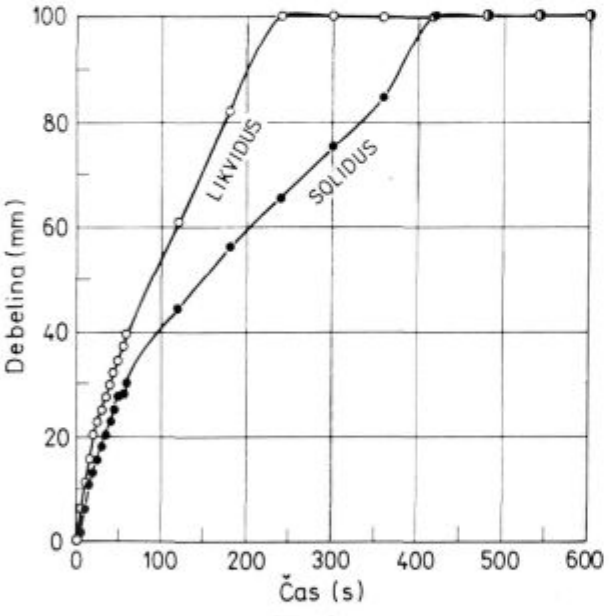
Pomembni podatki so še: hitrost ulivanja 1 m/min, dolžina hladilne cone pod prhami 16,493 m in celotna dolžina poti od meniskusa do mesta, kjer z dvigalom prenesemo ploščo pod prenosen pokrov, 38,321 m. Pod en prenosni pokrov je zloženih po 10 plošč ena na drugo. Po povprečno 640 min gredo plošče v potisno peč. Toplotno prestopnost med površjem plošč in hladilno vodo določimo s kombinacijo uporabe matematičnega modela in meritev temperatur na površju plošč v coni ohlajanja s sevanjem. Vrednost toplotne prestopnosti variiramo, dokler se izmerjene in izračunane temperature na površju plošč v coni ohlajanja s sevanjem ne ujemajo v mejah tolerance meritev. Primerjava izračunanih in izmerjenih temperatur je prikazana z diagramoma v **sliki 8**. Profil strjevanja je prikazan v **sliki 9**. Iz diagrama strjene debeline žile v odvisnosti od časa je razvidno, da je predvideni čas strjevanja 200 mm debele plošče 420 s.

Za to raziskavo je pomemben rezultat tudi potek ohlajanja pod prenosnim pokrovom. Za simulacijo ohlajanja pod prenosnim pokrovom so v matematičnem modelu spremenjeni robni pogoji. Glede na način zlaganja plošč smo privzeli, da se plošče ohlajajo le preko ploskev, ki se raztezajo po debelini, medtem ko so ploskve, ki se raztezajo po širini, toplotno izolirane. Diagram ohlajanja površja plošče in sredine kaže, da se po 900 s temperature v plošči praktično izenačijo, plošča pa se nato ohlaja zelo počasi. Račun torej kaže, da pridejo plošče do potisne peči z enakomerno temperaturo. Simulacija ohlajanja pod prenosnim pokrovom za 2513 s od časa izenačenja temperatur kaže, da se plošče ohladijo v tem času za 11° C. Zato lahko pričakujemo, da bodo imele plošče po 10 urah povprečnega zadrževanja pod havbo 158° C nižjo temperaturo od 878° C, ki je izračunana temperatura ob izenačenju. Pred peč pridejo torej plošče s temperaturo 720° C.



Slika 8.
Z modelom predvidene temperature na površju in v sredini 200 mm plošče ter primerjava z izmerjenimi vrednostmi na površju plošče

Fig. 8.
Model predicted surface and center temperatures of 200 mm slab and comparison with values measured from the slab surface

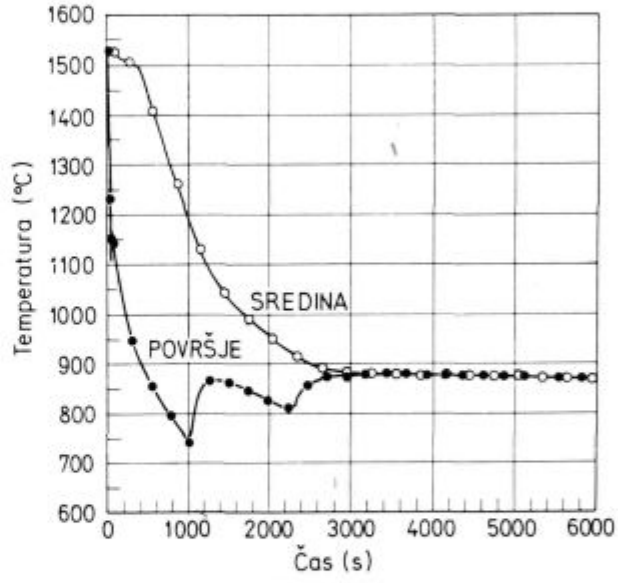


Slika 9.
Profil strjevanja

Fig. 9.
Solidification profile

7. SKLEP

Raziskava obravnava ugotavljanje začetne temperaturne porazdelitve v ploščah, ki se zalagajo v potisno peč v toplem stanju. Temperaturno stanje v toplih ploščah je rezultat predhodnega procesa odvajanja toplote pri kontinuirnem ulivanju plošč. Ker temperaturno stanje plošč pred zalaganjem v potisno peč ni enolično odvisno od obratovalnih pogojev predhodnih postopkov, smo razvili matematični model, ki simulira strjevanje in ohlajanje kontinuirno ulitih plošč. Model obravnava problem dvodimenzionalno, kar pomeni, da je po potrebi možno študirati tudi ohlajanje robov. V modelu je možno variirati robne pogoje. Zbrali smo povprečne podatke o robnih pogojih, ki vladajo pri kontinuirnem ulivanju plošč v Železarni Jesenice, in zanje simulirali potek procesa. Izvedli smo tudi meritve temperatur na površju plošč v coni ohlajanja s sevanjem, ki je meritvam edina dostopna. S primerjavo izračunanih in izmerjenih temperatur smo po nekaj ponovitvah simulacije lahko ocenili toplotno prestopnost v coni vodnih prh. Rezultat analize postopka ravnanja s ploščami kaže, da pridejo plošče pred peč z enakomerno temperaturno porazdelitvijo, kar nam pri računalniškem vodenju potisne peči omogoča določiti začetno sanje z meritvijo temperature površja plošče. Velikost temperature je odvisna od časa, ki mine od trenutka zlaganja pod prenosni pokrov do transporta v peč. Glede na privzete povprečne pogoje obratovanja bi plošče prišle pred peč s temperaturo 720° C. **(Slika 10)**



Slika 10.
Izenačenje temperatur v ploščah pod prenosnim pokrovom

Fig. 10.
Uniforming of temperatures under the portable cover

LITERATURA

1. Voigt H., Bullerschen K. G. in Friderich R.: Untersuchungen zum Heisstransport von Stranggussbrammen, Stahl und Eisen 110, 1990, 6, 97—105.
2. Brimacombe J. K., Samarasekera I. V. in Lait J. E.: Continuous Casting, Vol. 2, Heat Flow, Solidification and Crack Formation, BookCrafters, U.S.A. 1984.

Zahvala

Zahvaljujemo se vodstvu kontinuirne livne naprave v Jeklarni II Železarne Jesenice, da je omogočilo meritve in posredovalo potrebne podatke.

ZUSAMMENFASSUNG

Für die Prozesseführung des Erwärmungsvorganges im Stossofen ist es nötig die Anfangs und die Randbedingungen zu definieren. Ein Sonderproblem stellen vor, die Anfangsbedingungen beim Erwärmen von Stranggussbrammen, die einen Wä.meinhalt von dem vorgehendem Prozess haben. Die Bestimmung des Anfangstemperaturzustandes von warmeingesetzten Strangussbrammen in den Strossofen, basiert auf den Grundgesetzmössigkeiten der Wärmeübertragung beim Stranggiessen von Brammen. Die Wärmeleitung wird in zwei Dimensionen behandelt. Es wird vorausgesetzt, dass die Wärme in der Querrichtung geleitet wird, während den die Wärmeleitung in der Lägsrichtung vernachlässigt werden kann. Vom Meniskus aus bis zu der Schneide kült der Querschnitt des Stranges unter verschiedenen Randbedingungen ab, die in der Kokille, in der Sekundärkühlzone, und am Auslauf des Stranges herschen. Die Zeit wird auf kurze Zeitintervale Δt geteilt. Die Giessgeschwindigkeit ist konstant, so kann bei jeder Verlängerung der Zeit um Δt, die Lage des Querschnittes, und damit die Randbedingungen, berechnet werden. Für die Simulierung der Wärmeleitung ist die Differenzmethode angewendet worden. Die Ergebnisse werden in Diagrammen von Abkühlkurven, der Mitte, und der Oberfläche des Stranges, und der Abkühlfront, in Abhängigkeit von der Zeit, gezeigt. Für die Simulierung der Abkühlung von Stranggegossenen Brammen, die in Staffeln gelagert, unter einem Deckel abkühlen, werden im Modell nur die Randbedingungen geändert. Die Ergebnisse für diese Abkühlphase werden an zwei Diagrammen von Abkühlkurven, der Mitte, und der Oberfläche, gezeigt. Aus den Diagrammen für die Abkühlung der Oberfläche und der Mitte der Bramme ist ersichtlich, dass sich die Temperaturen anch 900 s praktisch ausgleichen. Die Simulierung der Abkühlung von Brammen unter einem Deckel zeigt, daß in 2513 s, gerechnet nach dem Temperaturausgleich, die Brammen in dieser Zeit um 11° C abkühlen. Nach im Durchschnitt 10 stundiger Verweilzeit unter dem Dekkel wird die Temperatur der Brammen um 158° C niedrige, von der ausgerechneten Ausgleichstemperatur von 878° C. Vor den Stossofen kommen die Brammen mit einer Temperatur von 720° C.

SUMMARY

The process control of slabs reheating in the pusher furnace requires initial and boundary conditions to be specified. A special problem arises with the hot charging of slabs which have a certain sensible heat from a beforehand process. Therefore, the determination of temperature distribution in the hot charged slabs is based on the mathematical model of heat extraction during the continuous casting of slabs, which is the beforehand process. The mathematical formulation is based on the first principles of heat transfer, and on empirical data. The heat conduction is treated in two dimensions. It is supposed that heat is conducted only in transverse direction, the conduction in axial direction being neglected. From the meniscus to the cut-off stand the transverse slice of the strand is being cooled under different boundary conditions which exist in the mold, spray colling zone and radiant cooling zone. The casting time is divided into short time intervals Δt. As the casting speed is constant, the position of the transverse slice can be calculated and, therefore, boundary conditions specified at each increase of time Δt. For the solution of heat conduction equation the explicit finite difference method was adopted. The results are shown in diagrams of center and surface cooling curves as well as solidification front as a function of time. For the simulation of cooling of slabs, which are piled up under movable cover after leaving cut-off stand, only the boundary conditions are changed in the mathematical model. The results are once again shown in diagrams of center and surface cooling curves. The cooling curves show that after 900 s the temperature distribution is uniform. Further simulation of cooling under the movable cover for 2513 s from the time of temperature equalisation show, that the slabs are cooled down 11° C. After keeping the slabs under the movable cover 10 hours in average, the slabs will have 158° C lower temperature of 878° C, which is calculated at the equalisation of temperatures. The initial temperature distribution before charging of hot slabs into the pusher furnace is thus uniform at 720° C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для процессного ведения нагревания в проходной методической печи необходимым является определить начальные и поверхностные условия. Особенную проблему представляют начальные условия при нагревании плит, содержающих теплоту из предварительного процесса.

Определение начального температурного состояния теплых загруженных плит в проходной методической печи основывается на основных закономерностях переноса теплоты при непрерывной разливке плит. Перевод теплоты рассматривался в двух димензиях. Предполагаем, что теплота переводится в поперечном направлении, а перевод теплоты в осном направлении незначительно. От менискуса до места резки поперечный разрез жилы охлаждается под различными поверхностными условиями, имеющимся в изложнице, под струями и на конце жилы. Время разделено на короткие периоды т. Скорость разливки — константная и потому при каждом повышении времени т можем высчитать положение поперечного разреза, а тем самим и поверхностные условия.

Для симуляции перевода теплоты мы использовали дифференциальный метод. Результаты показаны с диаграммами охладительных кривых середины и поверхности плиты, а также фронты отвердения в зависимости от времени. Для симуляции охлаждения плит, загруженных одна сверх другой под подвижной крышкой, в моделе изменены только поверхностные условия. Также по этой фазе охлаждения результаты показаны с диаграммами охладительных кривых середины и поверхности. Диаграммы охлаждения поверхности и середины плиты показывают, что температуры практически уравниваются по 900 с.

Симуляция охлаждения плит под подвижной крышкой за 2513 с с времени уравнения температур показывает, что в этом времени плиты охлаждены за 11° С. После 10 часов среднего задерживания под подвижной крышкой плиты потому имеют 158° С более низкую температуру от 878° С, которая является высчитанной температурой после уровнения. Значит, что перед печь поступают плиты температурой 720° С.