

Matematični model toplotnega stanja livne ponovce pri ogrevanju in vlivanju

UDK: 621.746.32:536
ASM/SLA: W19b, D11k, U4j

Božidar Brudar

Opisan je matematični model za prenos toplote v jeklarski ponovci. Pri tem predpostavljamo, da je stena ponovca lahko sestavljena iz več plasti z različnimi toplotnimi lastnostmi.

S pomočjo računalniškega programa smo simulirali vlivanje jeklene taline v ponovco in izračunali, kako se jeklo ohlaja in kako se pri tem povečuje toplotna vsebnost ponovca.

Ti teoretični rezultati kažejo na to, katere faze dela odločilno vplivajo na porabo energije in na toplotne izgube v jekleni talini.

Uvod

Ogrevanje ponovca v jeklarni je tehnološki proces, od katerega je odvisno uspešno vlivanje jekla v kokile. Pomemben pa je tudi zato, ker vedno več kvalitete jekla izdelamo zunaj peči (v ponovcih).

Tudi novi postopki vlivanja (konti liv) in vakuum-ska metalurgija zahtevajo, da natančneje prestudiramo prenos toplote v ponovcih, saj je od tega vedno bolj odvisna uspešnost dela v celotni jeklarni. Pri tem gre tudi za gospodarjenje z energijo, ki postaja vsak dan dražja in pomembno vpliva na lastno ceno izdelanega jekla.

Prevajanje toplote skozi steno in dno ponovca je mogoče opisati tudi matematično.

Izdelali smo matematični model za ta proces in tako lahko s pomočjo računalnika simuliramo različne pogoje v ponovci ter pri tem študiramo, kako ti pogoji vplivajo na toplotno stanje v ponovci.

Tako lahko s pomočjo računalniškega programa »spreminjamo obzidavo« v ponovci, kombiniramo različne materiale in izračunamo, koliko časa je treba ponovco ogrevati, da sprejme največjo možno količino toplote. Tudi jekleno talino lahko »vlijemo« v bolj ali manj ogreto ponovco in računamo, kako bi se to jeklo ohlajalo in kako bi se pri tem ponovca ogrevalo. Pri vsem tem pa računamo tudi toplotne tokove, izkoristek gorilcev in druge parametre, ki so pomembni za ekonomičnost procesa.

Pri vsakem matematičnem modelu moramo navadno nekatere parametre predpostaviti. Po možnosti izberemo takšne vrednosti, ki se kar najbolj ujemajo s prakso. Če to ni mogoče, izračunamo problem pri izjemno neugodnih pogojih in na osnovi rezultatov potem rečemo, da pričakujemo praktični rezultat boljši od izračunanega. Kljub nekaterim nepopolnostim takšnega matematičnega modela pa tak izračun vedno zelo dobro opiše relativne spremembe. Če na primer po našem modelu ugotovimo, da dvojna debelina ene od izolacijskih plasti v ponovci za 30 % zmanjša toplotne izgube, lahko tak rezultat pričakujemo tudi v praksi.

Namen te naloge je bil torej izdelati računalniški program, s katerim si lahko jeklarji-tehnologi pomagajo

pri svojem delu. Lahko ocenijo, koliko je treba na primer še ogrevati ponovco, preden vanjo vlijemo jeklo, da se jeklena talina ne bo po 2 urah ohladila pod kritično vrednost.

S pomočjo računalnika je mogoče dokaj dobro spremljati tudi energetske bilanco in stroške določene tehnološkega postopka.

Zelo pomembno je tudi to, da lahko s pomočjo programa študiramo, kako bi se obnašala ponovca s popolnoma novo obzidavo, o kateri nimamo praktičnih izkušenj, dobro pa poznamo toplotne lastnosti uporabljenih materialov.

Matematična formulacija

Predpostavljamo, da ima ponovca obliko valjaste posode. Stene in dno obravnavamo posebej in dopuščamo v vsaki po največ 5 izolacijskih plasti z različnimi lastnostmi.

Prenos toplote opišemo s parcialno diferencialno enačbo za prevajanje toplote, ki jo zapišemo v cilindrični obliki:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]$$

pri čemer pomenijo:

- T temperatura
- t' čas
- λ toplotna prevodnost
- ρ gostota
- C_p specifična toplota
- r' koordinata v radialni smeri
- z' koordinata v smeri osi

Pri tem predpostavljamo, da se toplotna prevodnost, gostota materiala in specifična toplota ne spreminjajo s temperaturo. Vpeljemo nove spremenljivke, da pretvorimo enačbo v brezdimenzijsko obliko:

$$r = \frac{r'}{a} \quad z = \frac{z'}{a} \quad t = \frac{t'}{t_0} \text{ in dobimo}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = C \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (1)$$

pri čemer pomeni

$$C = \frac{\lambda}{\rho C_p} \cdot \frac{t_0}{a^2}$$

Navadno si izberemo t_0 in a tako, da je $C = 1$. V našem primeru pa to naredimo nekoliko drugače, ker imamo opravka z več plastmi z različnimi vrednostmi λ , ρ in C_p . Upoštevati moramo namreč stabilnostni kriterij, ki je opisan v nadaljevanju.

b) Točka (2)

Gre za valjasto steno, preko katere odteka toplota v okolico. Predpostavljamo, da se zunanost ponovce ohlaja s konvekcijo. Za konvekcijski koeficient smo si izbrali $\alpha = 10 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$, tj. vrednost, ki jo pričakujemo pri teh temperaturah.

Gostota toplotnega toka, ki prihaja iz notranjosti na površino, je enaka gostoti toka, ki odteka v okolico:

$$-\lambda (\text{grad } T)_p = \alpha (T_p - T_{ok}),$$

pri čemer pomeni indeks p vrednosti na površini, T_{ok} pa temperaturo v okolici. V naši mreži torej lahko zapišemo:

$$\lambda \cdot \frac{T(I, 2, K) - (I, 1, K)}{R} = \alpha [T(I, 1, K) - T_{ok}]$$

Iz tega sledi, da mora ob vsakem času biti izpolnjena enačba:

$$T(I, 1, K) = \frac{\lambda \cdot T(I, 2, K) + \alpha \cdot R \cdot T_{ok}}{\alpha \cdot R + \lambda}$$

c) Točka (3)

Te točke ležijo na zgornji strani izolacijske plasti. Predpostavljamo, da gre tako kot pri točkah (2), tudi tu za ohlajanje s konvekcijo z $\alpha = 10 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Po enakem sklepanju kot zgoraj zapišemo, da mora ob vsakem času biti izpolnjena enačba:

$$T(I, J, K) = \frac{\lambda \cdot T(2, J, K) + \alpha \cdot Z \cdot T_{ok}}{\alpha \cdot Z + \lambda}$$

d) Točka (4)

Tudi za točke, ki ležijo na zunanji strani dna, predpostavljamo, da gre za ohlajanje s konvekcijo s konvekcijskim koeficientom α_d v okolico s temperaturo T_{dna} in podobno kot v točki (3) zapišemo:

$$T(IKON, J, K) = \frac{\lambda \cdot T(IKON - 1, J, K) + \alpha_d \cdot Z \cdot T_{dna}}{\alpha_d \cdot Z + \lambda}$$

V vseh primerih točk (2 – 4) vzamemo za λ vrednost, kakršno ima zunanja plast.

d) Točka (5)

V primeru, ko študiramo ogrevanje ponovce s plamenom, označujemo točke na notranji strani s (5). Predpostavljamo, da je v teh točkah temperatura ves čas konstantna TS i zato mora veljati v teh točkah ves čas ogrevanja ponovce:

$$T(I, J, K + 1) = T(I, J, K) = TS$$

e) Točka (6)

V teh točkah ne računamo temperature.

f) Točka (7)

To oznako uporabimo na notranji steni ponovce za točke, ki so v stiku s talino. Če jeklene taline ne dolijemo do vrha, nadomestimo točke (5) delno z oznakama (7), ki so v stiku s talino, in z (8), ki ležijo nad gladino.

Predpostavljamo, da se talina intenzivno meša oziroma da se temperature v talini tako hitro izenačijo, da ima vsa talina (točki 6 in 7) enako temperaturo. Zaradi odtekanja toplote skozi oblogo ponovce se talina počasi hladi.

Spremembo temperature v talini ob vsakem časovnem koraku določimo iz zahteve, da je sprememba temperature sorazmerna toploti, ki je v enem časovnem koraku odtekla skozi notranjo ploskev (7) v oblogo ponovce.

Pri tem seveda upoštevamo, da odteka toplota skozi valjasto steno in skozi ravno dno.

V časovnem intervalu $H \cdot t_p = \text{CINT}$ odteče skozi valjasto površino toplota Q_s :

$$Q_s = \sum_{I=IKG}^{IKK} 2\pi \cdot Z \cdot R (JKON - JK) \left[\frac{\lambda}{R} \cdot T_s - \frac{\lambda}{R} T(I, JK - 1, K) \right] \cdot \text{CINT},$$

pri čemer pomeni IKG indeks I na gladini taline, λ pa predstavlja toplotno prevodnost notranje plasti v steni ponovce, T_s je nova temperatura taline.

Podobno zapišemo tudi toploto Q_D , ki odteče v času CINT skozi dno:

$$Q_D = \sum_{J=JK+1}^{JKON} 2\pi R (JKON - J) \cdot R \left[\frac{\lambda}{Z} \cdot T_s - \frac{\lambda}{Z} T(IKK + 1, J, K) \right] \cdot \text{CINT}$$

V času CINT se zato zniža temperatura jeklene taline od T_J na T_x :

$$Q_s + Q_D = m_j \cdot C_{pj} (T_J - T_x)$$

Pri tem pomeni m_j maso jeklene taline, C_{pj} pa specifično toplotno jeklene taline.

g) Točka (8)

Te točke ležijo na notranji steni ponovce nad gladino. Predpostavljamo, da je toplotni tok v radialni smeri enak 0:

$$T(I, JK, K + 1) = T(I, JK, -1, K + 1)$$

h) Točka (13)

Leži na mejni ploskvi med dvema plastema v navpični steni. Trdimo, da je gostota toplotnega toka, ki prihaja z desne strani (λ_D), enaka gostoti toplotnega toka na levi strani (λ_L):

$$\lambda_L \cdot [T(I, J, K) - T(I, J - 1, K)] = \lambda_D \cdot [T(I, J + 1, K) - T(I, J, K)]$$

oziroma:

$$T(I, J, K) = \frac{\lambda_D \cdot T(I, J + 1, K) + \lambda_L \cdot T(I, J - 1, K)}{\lambda_D + \lambda_L}$$

i) Točka (14)

Leži na mejni ploskvi med dvema plastema v dnu. Trdimo, da je gostota toplotnega toka, ki prihaja od zgornje plasti (λ_z), enaka gostoti toplotnega toka v spodnji plasti (λ_s):

$$\lambda_z \cdot [T(I, J, K) - T(I - 1, J, K)] = \lambda_s \cdot [T(I + 1, J, K) - T(I, J, K)]$$

oziroma:

$$T(I, J, K) = \frac{\lambda_z \cdot T(I - 1, J, K) + \lambda_s \cdot T(I + 1, J, K)}{\lambda_z + \lambda_s}$$

Po navedenih predpostavkah lahko s pomočjo teh formul izračunamo temperaturo v vsaki mrežni točki ob vsakem času.

Računalniški program smo še nekoliko izpopolnili, tako da računamo poleg temperatur tudi toplotno vsebnost v steni ponovce in toplotne tokove, ki ob posameznih časih pritekajo in odtekaajo iz obloge ponovce.

 Ponovca firme Didier²

V tehničnih informacijah zahodnonemške firme DIDIER je bila opisana livna ponovca, obzidana z oblogo iz več tanjših plasti izolacijskega materiala. Notranjost pa je bila iz krom-magnezitne opeke, tipa REXAL 4 N. Navedene so bile toplotno tehnične lastnosti porabljene opeke in merski rezultati o toplotni bilanci in izgubah za 32-tonske ponovce.

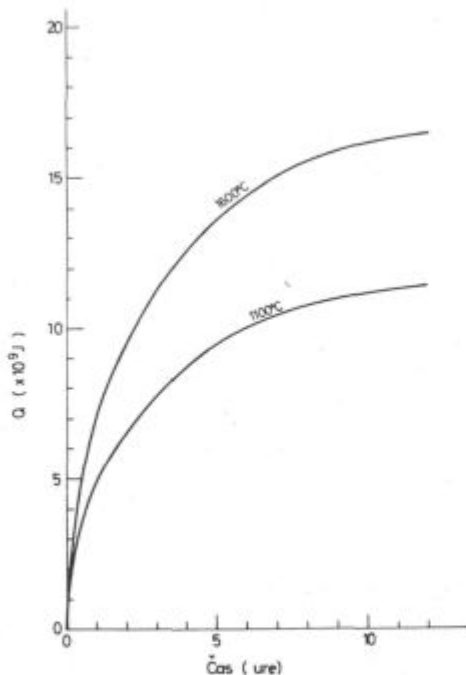
Ker z lastnimi eksperimentalnimi podatki še ne razpolagamo, smo želeli preizkusiti naš program na tem primeru. Uporabili smo podatke, ki so navedeni v poročilu o toplotnih prevodnostih in ostalih lastnostih materialov, in skušali sami izračunati vrednosti, ki so jih izračunali in izmerili v ZRN.

Zaradi lažjega računanja in ker niso bili navedeni vsi podatki za vse plasti v oblogi, smo po našem modelu predpostavili, da gre za steno, ki jo sestavljata dve plasti. Prva plast je debela 100 mm in je iz zelo lahkega ($\rho = 800 \text{ kg m}^{-3}$) izolacijskega materiala³ z oznako L 126 ($\lambda = 0,4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), druga plast pa je debela 200 mm in je iz opeke, tipa REXAL 4 N ($\rho = 3000 \text{ kg m}^{-3}$, $\lambda = 2,8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Dno je pa po našem modelu debelo prav tako 300 mm in je iz treh enako debelih plasti: L 126 šamot ($\rho = 2000 \text{ kg m}^{-3}$, $\lambda = 1,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), REXAL 4 N. Pri vseh treh materialih smo upoštevali isto specifično toplotno $C_p = 1000 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Najprej smo izračunali toplotno vsebnost, ki jo dosežemo v oblogi ponovce, če ima notranja stena stalno temperaturo 1100°C , kar bi ustrezalo dejanskemu ogrevanju ponovce z mazutnim gorilcem. Po daljšem času namreč lahko shranimo v oblogi neko največjo količino toplote — dosežemo stacionarno stanje. Koliko in kako hitro oblogo ogrejemo, je seveda odvisno od toplotnih lastnosti plasti.

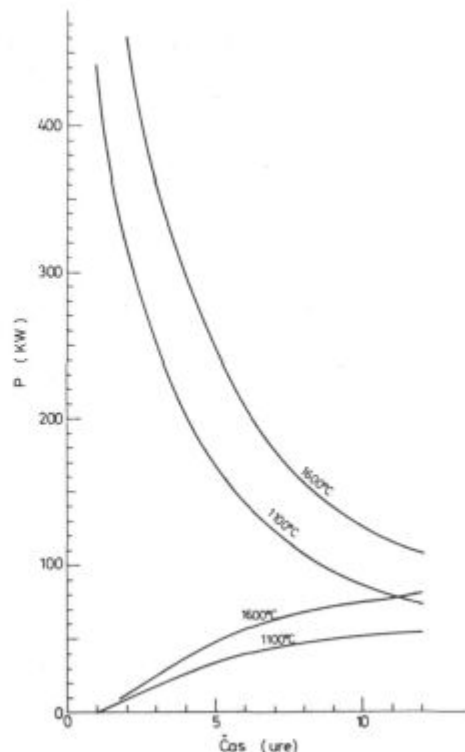
Če pa bi vlili v ponovco jeklo s temperaturo 1600°C , bi seveda spravili v oblogo več toplote in po daljšem času bi imeli drugo stacionarno stanje. Na sliki 2 je prikazana odvisnost toplotne energije Q v oblogi od časa t za oba primera. Rezultata se lepo ujemata tudi s poročilom omenjene firme, kjer so sicer navedene le maksimalne vrednosti.

Izračunali pa smo tudi toplotni tok, ki priteka v oblogo in odteka na zunanji strani iz obloge te ponovce. Na sliki 3 sta narisana oba primera, ko ogrevamo notranjost s temperaturo 1100°C in 1600°C . Zgornja



Slika 2
Toplotna vsebnost 32-tonske ponovce (DIDIER)

Fig. 2
Heat content in the 32-ton ladle (DIDIER)



Slika 3
Toplotni tokovi pri 32-tonski ponovci (DIDIER)

Fig. 3
Heat flux in the 32-ton ladle (DIDIER)

krivulja predstavlja toplotni tok, ki priteka, spodnja pa toplotni tok, ki odteka iz ponovce. Lepo se vidi, da bi v obeh primerih po nekaj več kot 12 urah dosegli stacionarno stanje. Za vzdrževanje maksimalne toplotne vsebnosti bi morali določeno toplotno dovajati in prav toliko bi je odtekalo ven.

Zanimiv je tudi prikaz, kako se s časom spreminja temperaturna porazdelitev v steni ponovce (slika 4). Debelejša črta označuje vrednosti, ki so navedene v poročilu².

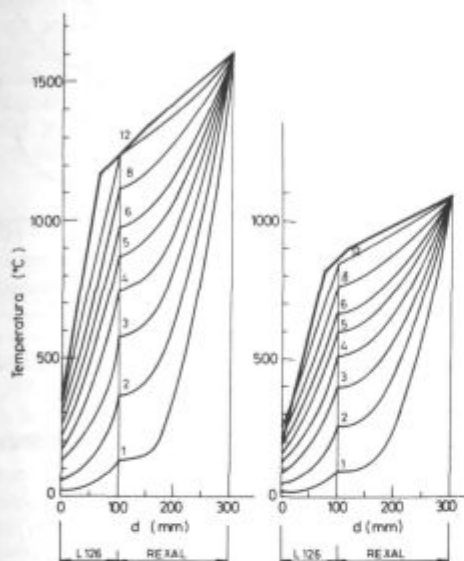
Pri praktičnem delu naj bi toplotna vsebnost ponovce nihala nekje med prvim in drugim stacionarnim stanjem. Ko namreč vanjo vlijemo jeklo, se toplotna vsebnost obloge močno zveča in zaželeno bi bilo, da si posamezne šarže sledijo čim hitreje. Tako bi se potem jeklo tudi najmanj ohladilo. Če bi vlili 32 ton jekla v to ponovco, bi se talina ohlajala po izračunih približno 25°C/h , kar se tudi lepo ujema s praktičnimi podatki.

Tako smo se na osnovi teh podatkov prepričali o pravilnosti našega modela in poiskali tudi vzroke za manjša odstopanja.

Naše ponovce

Z omenjenim programom smo simulirali tudi ogrevanje v 80-tonskih ponovcah, ki se uporabljajo v Železarni Jesenice. V tabeli so navedene debeline posameznih plasti v steni in njihove lastnosti: gostota v kg m^{-3} , toplotna prevodnost v $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ in debelina v mm. Poleg tega navajamo tudi maso celotne obloge in maso jekla, katerega gladina sega do 650 mm pod zgornji rob ponovce. Kot četrta je v tabeli navedena ponovca z oznako DIDIER — to bi bila 80-tonska ponovca, ki bi bila obzidana tako, kot prej 32-tonska ponovca.

Ponovca	Prva plast			Druga plast			Masa obloge	Masa jekla
	d	ρ	λ	d	ρ	λ		
I.	220	2000	1,5				14,3 t	77,6 t
II.	64	2000	1,5	160	3000	2,8	19,7 t	76,9 t
III.	64	2000	1,5	192	3000	2,8	21,9 t	72,8 t
DIDIER	100	800	0,4	200	3000	2,8	19,7 t	66,1 t

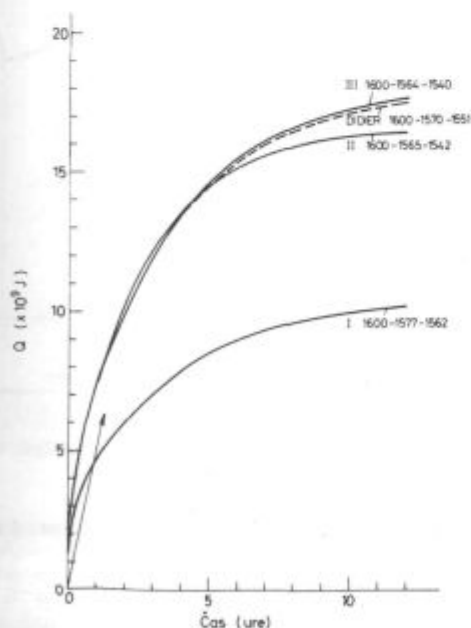


Slika 4

Temperatura v steni 32-tonske ponovce (DIDIER) po različnih časih ogrevanja, če je temperatura na notranji strani stalno 1100°C oziroma 1600°C

Fig. 4

Temperature in the wall of the 32-ton ladle (DIDIER) as a function of time when the inner temperature is held constant 1100°C and 1600°C



Slika 5

Toplotna vsebnost 80-tonskih ponovc z različno obzidavo

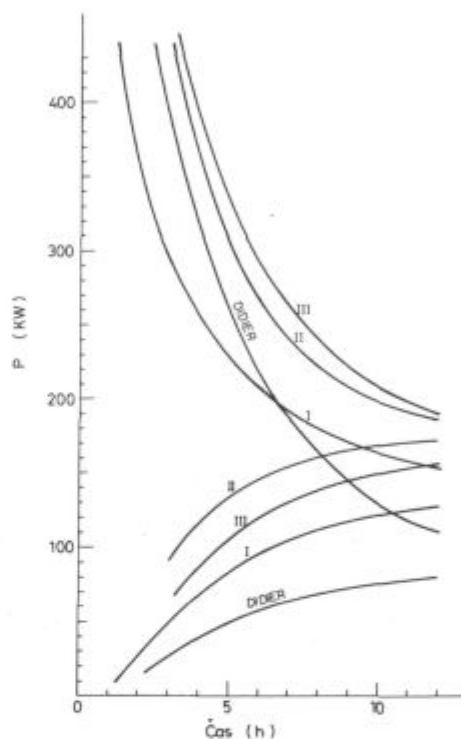
Fig. 5

Heat content of the 80-ton ladles with different refractory

Pri vsaki od teh ponovc smo predpostavili, da ima notranja stena temperaturo 1100°C in da to traja 12 ur. Na sliki 5 je prikazana količina toplote, ki bi jo spravili v oblogo posameznih ponovc v tem času. Na koncu vsake krivulje so navedene temperature, ki bi jih imela talina po takem ogrevanju po 1 uri in 2 urah zadrževanja v ponovci.

Očitno je najmanjša toplotna vsebnost pri šamotni ponovci (I) in tudi jeklo bi se v njej najmanj ohladilo.

Poleg tega ni posebno velikih razlik v doseženi toplotni vsebnosti med ponovcami II, III in DIDIER.



Slika 6

Toplotni tokovi pri ogrevanju 80-tonskih ponovc

Fig. 6

Heat flux by heating of 80-ton ladles

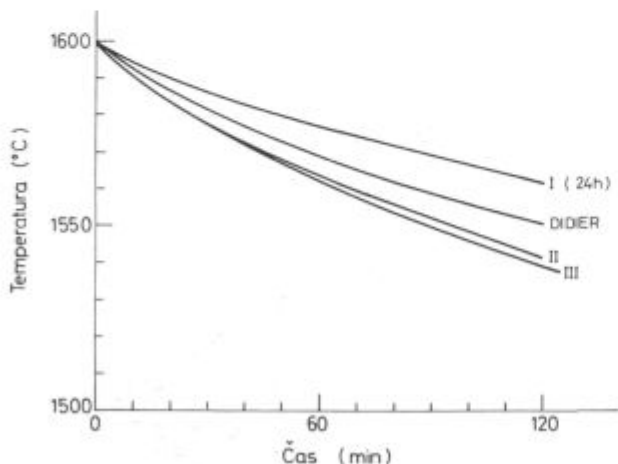
Precej bolj zanimiva pa je slika 6, ki prikazuje toplotne tokove v ponovcih. V primeru ponovce, ki bi bila obzidana z oblogo, ki jo predlaga firma DIDIER, bi bilo treba za vzdrževanje stacionarnega stanja skoraj dvakrat manj moči, kot pa v ostalih enakovrednih ponovcih II in III. Celo šamotna ponovca zahteva za vzdrževanje maksimalne toplotne vsebnosti v oblogi večjo moč. Med ponovcami II, III in DIDIER gre za pomembno razliko: izolacijska masa L 126 je tista, ki omogoča, da je za vzdrževanje tople ponovce treba dvakrat manj energije. Zato bi bilo iz ekonomskih razlogov nujno nadomestiti v naših ponovcih II in III zunanjo šamotno plast (64 mm) z neko vrsto penastega šamota ali kakšnega drugega boljšega izolacijskega materiala.

Kar se tiče ohlajanja jekla, lahko pričakujemo, da se bo talina bolj ohladila, če uporabljamo obzidavo iz krommagnezitne opeke (slika 7), kot pa iz šamota. Vendar je pri tem tudi pomembno, da imamo v prvi zunanji plasti dober izolacijski material.

Slika 8 in 9 kažeta temperaturno porazdelitev v steni za vse 4 ponovce (po 1, 3, 5 in 12 urah ogrevanja).

PRIMER, KI GA PRIČAKUJEMO V PRAKSI

Oglejmo si še primer ogrevanja in ohlajanja ponovce, ki ga tudi lahko simuliramo z našim programom. Predpostavljamo, da imamo opravka z 80-tonsko ponovco, ki je obzidana samo s šamotom (I). Najprej jo ogrevamo s temperaturo 1100°C 6 ur in potem vlijemo vanjo jeklo s temperaturo 1600°C, ki naj ostane v ponovci 2 uri. V tem času se jeklo ohladi od začetnih 1600°C na 1575°C oziroma 1557°C. Po dveh urah izlijemo jeklo ven in pustimo, da se ponovca hladi na zraku. Matematično simuliramo skrajno neugodno situacijo.

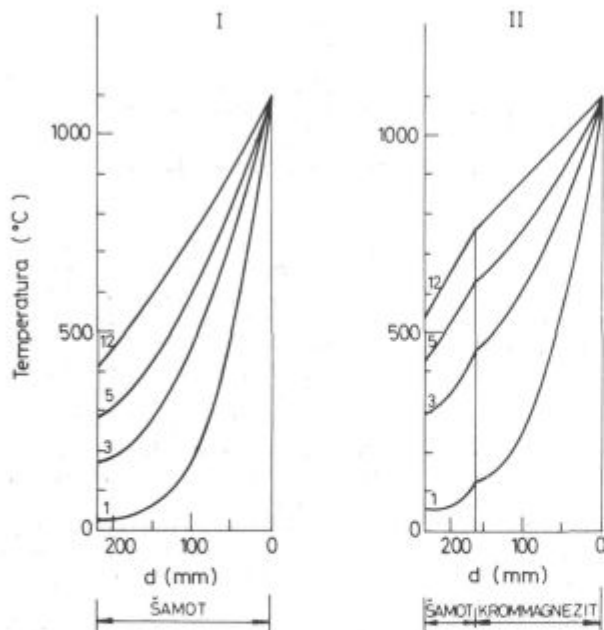


Slika 7

Ohlajanje taline v ponovci, ki smo jo predhodno ogrevali 12 ur (primer I — 24 ur)

Fig. 7

Cooling of liquid steel in the ladle that was previously heated 12 hours (case I — 24 hours)

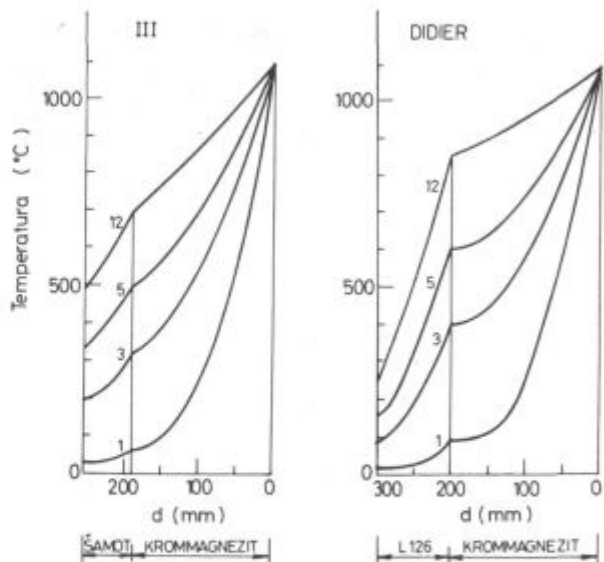


Slika 8

Temperatura v steni ponovc (I. in II.) po različnih časih ogrevanja

Fig. 8

Temperature in the wall of the ladles I. and II. as a function of the heating time

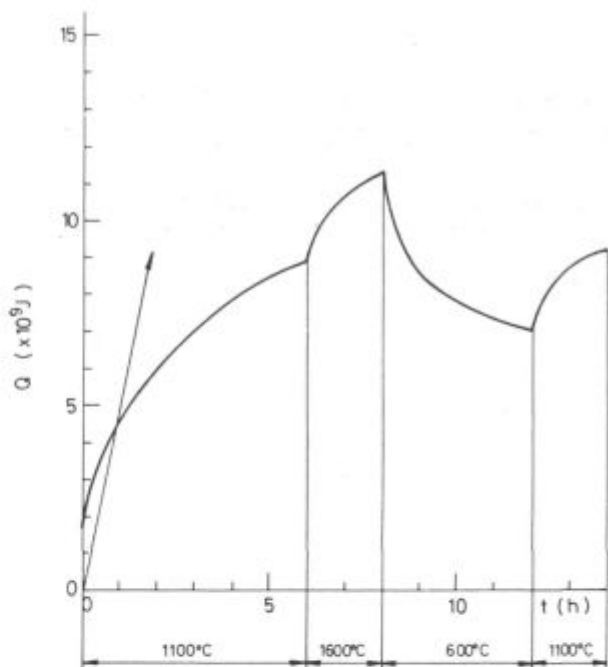


Slika 9

Temperatura v steni ponovc (III in DIDIER) po različnih časih ogrevanja

Fig. 9

Temperature in the wall of the ladles III. and DIDIER as a function of the heating time



Slika 10

Toplotna vsebnost 80-tonske ponovce (I) pri različnih toplotnih razmerah

Fig. 10

Heat content of the 80-ton ladle (I) as a function of different heating conditions.

Predpostavljamo, da se notranja stena obloge v trenutku ohladi na 600°C in tolikšna tudi ostane 4 ure. Po 4 urah takšnega ohlajanja si mislimo, da ponovco ponovno ogrevamo s temperaturo 1100°C 2 uri. S slike 10 se vidi, da bi po 2 urah ogrevanja praktično skoraj kom-

penzirali izgubo toplote in da bi pri ponovnem vlivanju lahko pričakovali enako ohladitev taline.

IZKORISTEK GORILCEV

Ponovce navadno ogrevamo z gorilci na mazut ali plin, ki pa imajo razmeroma veliko moč. V naši Železarni so v rabi gorilci z močjo 1,4 MW, kar je na slikah Q (t) označeno s puščico. Začetni toplotni tokovi, ki smo jih izračunali po naših predpostavkah, so res zelo veliki, vendar pa je mogoče videti iz diagramov Q (t), da je pri ogrevanju hladne ponovce na približno 80 % maksimalne toplote, ki jo lahko spravimo v oblogo, izkoristek energije gorilcev približno 30 %. Če pa s takim gorilcem ogrevamo ponovco med enim in drugim vlivanjem jekla, je pa izkoristek izredno nizek (7–10 %).

ZAKLJUČEK

Matematični model za prenos toplote v ponovci daje zelo nazorno sliko o toplotni vsebnosti, temperaturnih gradientih v oblogi in v toplotnih tokovih, ki pritekajo na notranji strani in odteka skozi zunanjo steno. Rezultati matematične simulacije pri 32-fonski ponovci forme DIDIER se odlično ujemajo z eksperimentalnimi podatki, ki so navedeni v njihovem poročilu.

Glede naših ponovc pa lahko rečemo naslednje:

Šamotna obloga bi se gotovo najbolj obnesla, saj je pri tej ohlajenju taline najmanjše.

Nova tehnologija pa zahteva uporabo krom-magnezitne opeke, ki je težja in ima slabše izolacijske sposobnosti kot šamot. Zato se po pričakovanju tudi talina nekoliko hitreje hladi. Prav zaradi tega je pa toliko pomembnejše ogrevanje ponovce med eno in drugo šaržo. Zaradi slabe ekonomičnosti gorilcev na mazut ali plin bi bilo treba razmisliti o drugih možnostih ogrevanja in ponovno preštudirati možnost uporabe pokrovov.

Brez dvoma pa bi bilo nujno potrebno pri naših ponovcih II in III, ki so obložene z magnezitno opeko, nadomestiti prvo plast šamota z boljšim izolatorjem. Slika 7 nazorno kaže, da bi za vzdrževanje toplote v ponovci, ki bi imela na primer oblogo, ki jo predlaga firma DIDIER, porabili tudi do 50 % manj energije. Poleg tega se s slike 10 vidi, da bi po 4 urah ohlajanja (600°C) zadoščalo le 2 uri ogrevanja (1100°C), da bi dosegli enako toplotno vsebnost, kot pred vlivanjem prve šarže. Veljalo bi lahko splošno pravilo: če med dvema zaporednima vlivanjema mine manj kot 2 uri, ponovce ni treba dodatno ogrevati. Če pa ostaja ponovca na zraku dalj časa, je potrebno polovico tega časa, da jo ogrevamo s temperaturo 1100°C. Zaradi slabe ekonomičnosti gorilca pa naj ne bi ogrevanje trajalo več kot 6 ur, da bi dosegli nekako 80 % možne toplote v oblogi. Daljše ogrevanje se s stališča toplote, ki jo še pridobimo v oblogi, in ogromno količino toplote, ki jo trošijo gorilci, prav gotovo ne splača.

Idealno bi bilo, če bi si zaporedna vlivanja sledila hitreje kot po 1 uri, saj bi bila ponovca takrat najbolj topla in bi se njena toplotna vsebnost gibala nekje med spodnjim in zgornjim stacionarnim stanjem, česar s segrevanjem z gorilci nikdar ni mogoče doseči.

V bodoče bo sicer treba čimveč predpostavljanih parametrov nadomestiti z merskimi rezultati. Tako bo matematični model dal lahko še zanesljivejše in uporabnejše rezultate.

Literatura

1. G. D. Smith Numerical Solution of Partial Differential Equations, Oxford University Press, London 1971
2. Didier Technische Informationen, Stoeko — Hauspost Nr. 4/76D, DIDIER WERKE, VERKAUFSGRUPPE II. STOECKEN & KUNZ, 415 KREFELD-LINN Rheinhafen.
3. Feuerfeste und säurebeständige Erzeugnisse Didier-Werke, Hauptverwaltung Wiesbaden.

ZUSAMMENFASSUNG

Die rechnerische Simulation der Erwärmung einer Pfanne und der Abkühlung von Stahl in ihr hat folgende interessante Ergebnisse ergeben, die auch für die praktische Arbeit von Wichtigkeit sind. Bei einer besseren Ausmauerung des Dauerfutters in mehreren Schichten und besseren Isolationseigenschaften konnten die Wärmeverluste zur Hälfte reduziert werden. Wenn zwischen zwei Abstichen weniger als zwei Stunden vergehen, braucht die Pfanne nicht zusätzlich erwärmt zu werden. Falls diese Zeit länger ist, ist die nötige Erwärmungszeit gleich der Hälfte der Zeit, die zwischen zwei Abstichen verlau-

fen ist. Das zusätzliche Erwärmen der Pfannen mit dem Schwerölbrenner ist äusserst unökonomisch, da der Wärmegrad sehr klein ist (unter 10 %). Eine entsprechend bessere Art der Pfannenerwärmung sollte angewendet werden.

Anhand der praktischen Versuche müsste noch die These bestätigt werden, dass die Vorwärmung der Pfannen nicht länger als 6 Stunden dauern sollte, da die weitere Vorwärmung sehr teuer ist. Ein Kompromiss unter den Kosten für die weitere Vorwärmung der Pfannen und den Kosten die die Wärmeverluste in der Schmelze darstellen, wird zu finden.

SUMMARY

Computer simulation of heating the ladle and of cooling the steel in it gave the following interesting results which are important also in practical work: If the ladles are more carefully lined and simultaneously more layers with better insulating properties applied, the stationary losses can be halved. If the intervals between single pourings into the ladle do not exceed 2 hours the ladle needs not to be additionally heated. At longer intervals the period of additional heating is equal to the half of period between the two consecutive melts. Additional

heating of ladle with an oil burner is extremely unprofitable since the heat efficiency is very low ($< 10\%$). A more suitable way of heating must be chosen.

Practical experiments must confirm the supposition that heating of ladle should not be longer than 6 hours since further heating is extremely expensive. It is necessary to find optimum between the costs of additional heating of ladle and the costs of thermal losses in the steel melt.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вычислительное моделирование нагрева ковша и в ней охлаждения стали дало следующие достопримечательные результаты, которые значительны также для практической работы. Если тщательнее выполнять обмуровку и при этом употребить больше слоев с лучшими изолирующими способностями, которые бы могли уменьшить стационарные потери на половину. Если между отдельным литьем не пройдет больше чем два часа, то ковш не подлежит добавочному нагреву. Если же пройдет больше чем два часа, то следует подогреть ковш на половину времени, которое было утрачено на две последовательные шихты.

Добавочный нагрев с мазутной горелкой очень неэкономичный, так как теплоиспользование очень незначительно (10%). Надо искать более соответственный способ нагрева.

С практическими опытами надо ещё подтвердить тезис, чтобы нагрев ковша не продолжался больше 6-ти часов, так как дальнейший нагрев очень дорог. Надо искать компромиссное решение между расходами, которые составляют добавочный нагрев ковша с расходами тепловых потерь в расплаве стали.