

PREGLEDNI RAD

R. Kovač*

ODREĐJIVANJE KOEFICIJENTA PRELAZA TOPLOTE U SISTEMU
ODLIVAK-METALNI KALUP

Rezime

Koeficijent prelaza toplote sistema odlivak-kalup određuje intenzitet hladjenja odlivka, te predstavlja značajan parametar sistema. U radu je dat metod određivanja približne vrednosti ovog koeficijenta koji se koristi kako pri analitičkim metodama analize procesa očvršćavanja odlivka, tako i u pogonskim uslovima za ocenu intenziteta hladjenja i njegovog uticaja na strukturu i mehanička svojstva odlivka.

DETERMINATION OF HEAT-TRANSFER COEFFICIENT IN
CASTING-DIE SYSTEM

Summary

The intensity of casting-cooling is determined by the heat-transfer coefficient between the casting and the die, and it represents important parameter of the system. In this paper, the method determination of this coefficient and its approximate value is shown. This method is used in analytic analysis process of casting solidification and in practice also for marking the cooling intensity and its influence on the structure and the mechanical properties of castings.

1. UVOD

Proces kristalizacije i kasnije hladjenje odlivka, u velikoj meri, zavisi od intenziteta odvodjenja toplote od odlivka u kalup. Toplota iz bilo kog dela odlivka mora biti odvedena u njegove površinske slojeve, a zatim predata kalupu. Intenzivnost toplotnog dejstva odlivka na radnu površinu kalupa, zavisi od koeficijenta

*) Kovač dr Risto, dipl. ing., docent, Fakultet tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo, 21000 Novi Sad, V. Perića-Valtera 2.

prelaza toplote na površini odlivka. Da bi se odredio ovaj koeficijent razmotriće se uzajamnost dejstva sistema odlivak-kalup.

Pre livenja radna površina metalnog kalupa (kokile) prekriva se premazom čija debljina x_p iznosi 0,2-1,0 mm [2]. Uloga premaza je da poveća vek kalupa, spreči lepljenje metala za kalup, reguliše intenzitet odvodjenja toplote iz odlivka i olakša vadjenje odlivka.

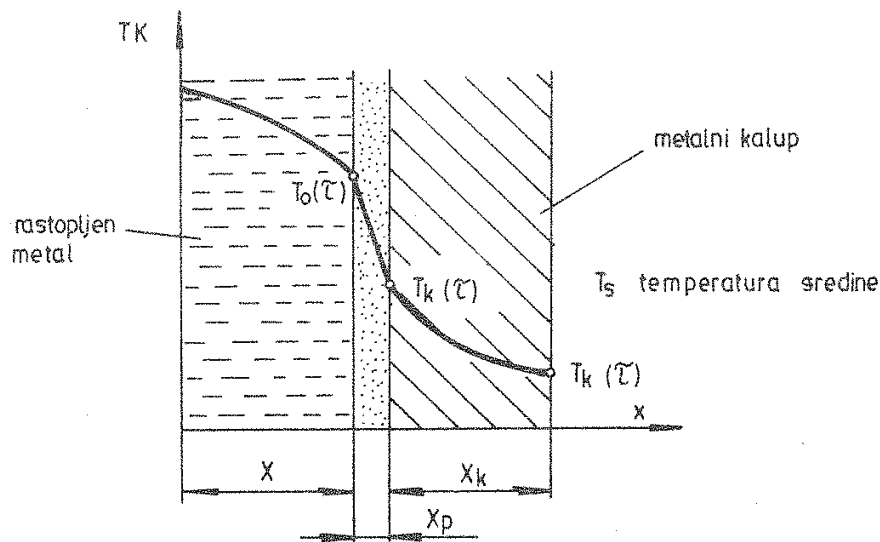
Ovako sačinjen zid metalnog kalupa može se u termičkom smislu posmatrati kao zid sa dva sloja, gde svaki od njih karakterišu dimenzije i toplotnofizičke osobine materijala od koga su izrađeni.

U procesu očvršćavanja rastopa po obrazovanju dovoljno čvrste kore, između odlivka i kalupa stvara se gasni zazor. Ovaj zazor posledica je skupljanja materijala odlivka i širenja materijala kalupa, a dejstvo mu je takvo da pruža otpor prelazu toplote.

Gasni zazor se stvara tek po obrazovanju čvrste kore u površinskim slojevima odlivka, te isti treba uzeti u obzir samo pri razmatranju hladjenja već očvrstlog odlivka. U ovom radu razmatraće se samo period očvršćavanja u toku koga se ne stvara gasni zazor, jer rastopljeni metal naleže na zidove kalupa.

2. POSTAVKA PROBLEMA

Zid metalnog kalupa posmatraće se kao da je sastavljen iz dva sloja, premaza i metalnog zida, kako je to prikazano na slici 1.



Slika 1.

Temperature površina rastopa i premaza su iste, jer se dodiruju u svim tačkama. Temperaturno polje posmatranog sistema prikazano je šematski, odakle se vidi da su temperature kontaktnih površina u nekom vremenskom trenutku iste.

Količina toplote (specifični toplotni fluks) koja prolazi kroz premaz debljine x_p sa koeficijentom provodjenja toplote λ_p odredjena je prema prethodnoj skici izrazom [3]

$$q(\tau) = \frac{\lambda_p}{x_p} |T_o(\tau) - T_{k1}(\tau)| \quad (1)$$

Odnos λ_p/x_p predstavlja termički otpor premaza i ima veliki uticaj na intenzitet odvodjenja toplote, od odlivka u kalup i okolnu sredinu.

Količina toplote koja se odvodi kroz metalni zid kalupa, analigno prethodnom izrazu, je

$$q(\tau) = \frac{\lambda_k}{x_k} |T_{k1}(\tau) - T_{k2}(\tau)| \quad (2)$$

Količina toplote koja se sa spoljne površine zida kalupa preda okolini koja ga okružuje, je

$$q(\tau) = \alpha_2 |T_{k2}(\tau) - T_s| \quad (3)$$

Ako se izrazi pad temperature po preseku svake od razmatranih sredina (premaz, metalni zid kalupa, spoljna površina kalupa-okolna sredina), a zatim saberu leve i desne strane tih jednačina, dobija se

$$T_o(\tau) - T_s = q(\tau) \left(\frac{x_p}{\lambda_p} + \frac{x_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_2} \right) \quad (4)$$

Izraz u zagradi desne strane ove jednačine predstavlja termički otpor kalupa provodjenju toplote i ako se označi sa $1/\alpha$, tada je

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{x_p}{\lambda_p} + \frac{x_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (5)$$

Izraz pokazuje da je ukupan termički otpor na površini odlivka $1/\alpha$ jednak sumi termičkih otpora: premaza x_p/λ_p , metalnog zida x_k/λ_k i termičkog otpora na spoljnom zidu kalupa $1/\alpha_2$.

Termički otpor premaza i metalnog zida kalupa lako se određuju, jer su koeficijenti provodjenja toplote λ_p i λ_k poznati za čitav niz materijala od koga se isti rade. Veći problem predstavlja određivanje koeficijenta prelaza toplote na spoljnoj površini kalupa α_2 .

Za određivanje ovog koeficijenta koristiće se poznate jednačine iz teorije prenosa toplote. Količina toplote koju neko telo preda sredini koja ga okružuje, sastoji se od količine toplote predate konvekcijom q_k i količine toplote predate zračenjem q_z . Ova dva oblika prenosa toplote razlikuju se po mehanizmu, te ih je potrebno, ukratko, posebno prikazati.

Količina toplote koja se prenese konvekcijom, sa površine nekog tela u sredinu koja ga okružuje, može se približno odrediti prema zakonu prenosa toplote Njutna [3]. Prema ovom zakonu, količina toplote odata jedinicom površine tela, u jedinici vremena, proporcionalna je razlici temperatura površine tela $T_{k2}(\tau)$ i okoline sredine T_s

$$q_{k(\tau)} = \alpha_k |T_{k2}(\tau) - T_s| \quad (6)$$

Koeficijent prelaza toplote α_k karakteriše intenzivnost prenosa toplote medju površinom kalupa i sredinom koja ga okružuje. Ovaj koeficijent zavisi od sredine u kojoj se kalup nalazi (hladjenje vazduhom, vodom, itd.).

Ako kalup okružuje vazduh temperature 293 K, tada je, prema [3]

$$\alpha_k = B_k |T_{k2}(\tau) - T_s|^{1/3} = 1,63 |T_{k2}(\tau) - T_s|^{1/3} \quad (7)$$

gde je:

$$B_k = 1,63 \text{ W/m}^2 \text{ K}^{4/3}.$$

Prenos toplote zračenjem sa spoljne površine kalupa u sredini koja ga okružuje, ostvaruje se posredstvom elektromagnetnih talasa koji se javljaju usled transformacije dela unutrašnje energije u energiju elektromagnetnih oscilacija. Veza izmedju količine toplote i temperature zračeće površine apsolutnog crnog tela uspostavlja se zakonom Stefana-Bolcmana [2]

$$q_z(\tau) = C_0 \left| \frac{T_{k2}(\tau)}{100} \right|^4$$

Zakon Stefana-Bolcmana ispravan je samo za crna tela koja zrače toplotu u vakuum. Ispitivanja Stefana i drugih istraživača pokazala su da se ovaj zakon može primeniti i za "siva" tela, ako se korekcija ovog zakona izvrši uvođenjem neke konstante ϵ , koja karakteriše stepen crnoće tela, te je

$$q_z(\tau) = \epsilon \cdot C_0 \left| \frac{T_{k2}(\tau)}{100} \right|^4$$

U realnim uslovima telo koje odaje toplotu zračenjem okruženo je drugim telima, te ako telo koje čini okolnu sredinu ima temperaturu T_s K, tada je količina toplote odate zračenjem

$$q_z(\tau) = C_z \left| \left(\frac{T_{k2}(\tau)}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_s}{100} \right)^4 \right|. \quad (8)$$

Koeficijent zračenja sistema tela $C_z = \epsilon C_0$ kada jedno drugo okružuje ravan je

$$C_z = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_0}}$$

Vrednosti koeficijenata zračenja prvog i drugog tela, C_1 i C_2 za različite materijale dati su u [3].

Veličina $q_z(\tau)$ uslovno se može odrediti iz izraza

$$q_z(\tau) = \alpha_z |T_{k2}(\tau) - T_s| \quad (9)$$

Izjednačavanjem izraza (9) gde su $T_{k2}(\tau)$ i T_s u K, i izraza (8), dobije se izraz za odredjivanje koeficijenta prelaza toplote zračenjem

$$\alpha_z = \frac{C_z \left| \left(\frac{T_{k2}(\tau)}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_s}{100} \right)^4 \right|}{T_{k2}(\tau) - T_s} \quad (10)$$

Za čelik sa svetlim oksidnim slojem po površini, veličina koeficijenta zračenja $C_z = 4,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4$ [3].

Kada se sa površine tela toplota odvodi konvekcijom i zračenjem, kao što je napred izneto, tada se radi o složenom prenosu

toplote, te je ukupna količina toplote predata okolnoj sredini jednaka zbiru ove dve količine toplote. Iz (6) i (9) dobija se:

$$q(\tau) = q_k(\tau) + q_z(\tau) = (\alpha_k + \alpha_z) |T_{k2}(\tau) - T_s| \quad (11)$$

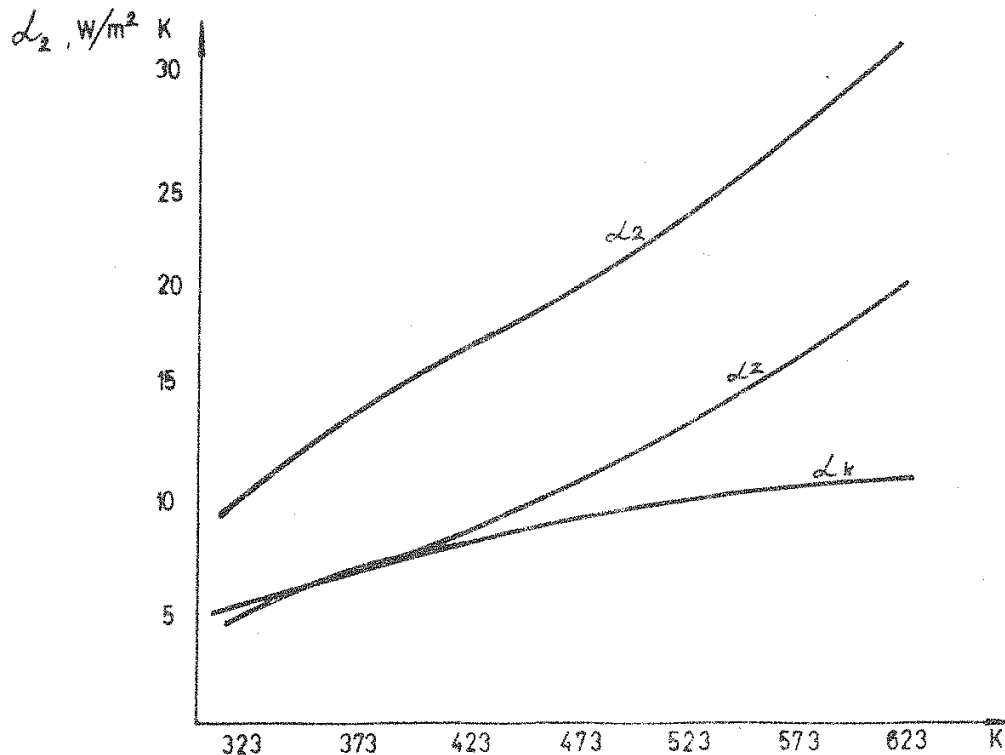
ili

$$\alpha_2 = \alpha_k + \alpha_z \quad (12)$$

α_2 - predstavlja ukupni koeficijent prelaza toplote na spoljnoj površini metalnog kalupa $T_{k2}(\tau)$.

Merenjem temperature na spoljnoj površini metalnog kalupa $T_{k2}(\tau)$ može se odrediti koeficijent prelaza toplote α_2 . Radi lakšeg korišćenja, ovaj koeficijent pogodno je predstaviti grafički za odredjen opseg temperatura $T_{k2}(\tau)$. Zavisnost koeficijenta α_k , α_z i α_2 od temperature $T_{k2}(\tau)$ data je na sledećem dijagramu, prema obrascima (7), (10) i (12). Pri tom je smatrano da se metalni kalup nalazi u sredini čija je temperatura $T_s = 293 \text{ K}$ ($20 \text{ }^\circ\text{C}$).

Odredjivanje koeficijenta prelaza toplote α_2 , a time i datog izrazom (5) otežano je zbog nepoznavanja temperature $T_{k2}(\tau)$ koja



Slika 2.

se menja. Njeno poznavanje u svakom trenutku zahtevalo bi nepres-tano merenje, što je svakako neugodno i neprihvatljivo za praksu.

Da bi se odstranile ove teškoće Vejník [3] je predložio po-seban prilaz ovom problemu koji omogućava da se koeficijent preja-za toplote , u principu, može uzeti kao konstantna veličina. Prema istom autoru, dobijeni rezultati su potvrđjeni eksperimen-talno i daju dobre rezultate. Pri razmatranju ovoga problema pretpostavlja se da su sve geometrijske i toplotnofizičke veliči-ne sistema odlivak-kalup poznate.

3. JEDNAČINA TOPLOTNOG BILANSA SISTEMA ODLIVAK-KALUP

Upšteno govoreći, proces kristalizacije i hladjenje odlivka u metalnom kalupu obavlja se odvodjenjem neke količine toplote u sredinu koja okružuje kalup. Odvodjenje toplote sa spoljne povr-šine kalupa obavlja se konvekcijom i zračenjem, što je uslovljeno veličinom koeficijenta prelaza toplote α_2 . Odvedena količina top-lote sa spoljne površine metalnog kalupa može se odrediti na os-novu opšteg zakona prenosa toplote

$$Q_s(\tau) = \int_0^{\tau} \alpha_2 |T_{k2}(\tau) - T_s| S_k d\tau \quad (13)$$

gde je:

S_k - spoljna površina metalnog kalupa.

Ako bi se metalni kalup sa spoljne strane prekrío (izolovao) materijalom koji ne propušta toplotu, tada bi toplota koju odaje odlivak bila akumulirana zidom kalupa. Usled toga bi u nekom du-žem vremenskom periodu i odlivak i kalup imali istu temperaturu. Ovu temperaturu Vejník je nazvao srednja kalorimetrijska tempe-ratura T_{km} , sistema odlivak-kalup. Ova temperatura odrediće se iz jednačine toplotnog bilansa sistema odlivak-kalup.

Količina toplote koju oda odlivak hladjenjem od temperature livenja T_z , do srednje kalorimetrijske temperature T_{km} , je:

$$G c(T_z - T_{km}) + LG \quad (14)$$

gde je:

G - masa odlivka, a

c - specifična toplota materijala odlivka

L - specifična toplota kristalizacije.

S druge strane, količina toplote koju akumulira metalni kalup, zagrevanjem od početne temperature kalupa T_{kp} , do dostizanja srednje kalorimetrijske temperature je:

$$G_k c_k (T_{km} - T_{kp}) \quad (15)$$

gde je:

G_k - masa metalnog kalupa, a

c_k - specifična toplota materijala kalupa.

Izjednačavanjem izraza (14) i (15) dobija se jednačina toplotnog bilansa sistema odlivak-kalup

$$G c (T_z - T_{km}) + L G = G_k c_k (T_{km} - T_{kp}) \quad (16)$$

Iz ove jednačine lako je odrediti izraz za srednju kalorimetrijsku temperaturu sistema odlivak-kalup

$$T_{km} = \frac{T_z + \frac{L}{c} + \frac{G_k c_k}{G c} T_{kp}}{1 + \frac{G_k c_k}{G c}} \quad (17)$$

U realnim uslovima livenja metalni kalup se hladi odajući toplotu sredini u kojoj se nalazi, prema izrazu (13). U ovom slučaju sistem odlivak-kalup imaće drugu vrednost srednje kalorimetrijske temperature T_{kms} manju od T_{km} ($T_{kms} < T_{km}$) zbog odvodjenja toplote u okolnu sredinu. Jednačina toplotnog bilansa za ovaj slučaj je:

$$G c (T_z - T_{kms}) + L \cdot G = G_k c_k (T_{kms} - T_{kp}) + Q_s(\tau) \quad (18)$$

Iz ove jednačine toplotnog bilansa, dobija se izraz za srednju kalorimetrijsku temperaturu u obliku

$$T_{kms} = \frac{T_z + \frac{L}{c} + \frac{G_k c_k}{G c} T_{kp} - \frac{Q_s(\tau)}{G c}}{1 + \frac{G_k c_k}{G c}} \quad (19)$$

Izraz pokazuje da se srednja kalorimetrijska temperatura sa proticanjem vremena umanjuje (zbog $Q_s(\tau)$).

U periodu odvodjenja toplote pregrevanja liva i periodu kristalizacije ova temperatura može se uzeti kao konstantna veličina.

Treba imati u vidu da pri malim debljinama zida kalupa u odnosu na debljinu odlivka, vrednost srednje kalorimetrijske temperature može porasti do temperature kristalizacije, te u tom slučaju veliku ulogu igra $Q_s(\tau)$. Iz tog razloga dobro je da se odredi granica primene srednje kalorimetrijske temperature.

Pri $Q_s(\tau) \approx 0$ izrazi (19) i (17) su isti, te se iz (17) može izraziti odnos mase metalnog kalupa i odlivka u zavisnosti od veličina koje figuriraju u tom obrascu. Da bi srednja kalorimetrijska temperatura bila manja od temperature kristalizacije $T_{km} < T_{kr}$, iz (17) se dobija da je:

$$\frac{G_k c_k}{G c} > \frac{T_z - T_{kr} + \frac{L}{c}}{T_{kr} - T_{kp}} \quad (20)$$

Ako je ovaj uslov ispunjen, srednju kalorimetrijsku temperaturu treba uzeti u obzir pri proračunu procesa.

Srednja kalorimetrijska temperatura T_{km} predstavlja, ustvari, veličinu ka kojoj teži da se ohladi odlivak i zagreje kalup. Imajući ovo u vidu, ona se može shvatiti kao neka zamišljena temperatura okolne sredine u kojoj se hladi odlivak i zagreva kalup.

Iz prethodnog razmatranja proizilazi da je $T_o(\tau) > T_{km} > T_{k1}(\tau)$. (Vidi sliku 1) $T_{k1}(\tau)$ - temperatura na unutrašnjem zidu metalnog kalupa, u trenutku livenja jednaka je temperaturi na koju je kalup zagrejan T_{kp} (početna temperatura kalupa).

Da bi se odredio koeficijent prelaza toplote na površini odlivka α , u zavisnosti od srednje kalorimetrijske temperature i ostalih parametara sistema odlivak-kalup, predstavimo sebi sledeće.

Neka se odlivak sa temperaturom površine $T_o(\alpha)$, i koeficijentom prelaza toplote α , hladi u sredini koja ima temperaturu T_{kms} . Tada će količina toplote, koju odlivak oda toj sredini, biti ravna

$$q(\tau) = \alpha |T_o(\tau) - T_{kms}| \quad (21)$$

S druge strane, ukupna količina toplote koja se preda metalnom zidu kalupa, a prolazi kroz premaz odredjena je izrazom

$$q(\tau) = \frac{\lambda_p}{x_p} |T_o(\tau) - T_{kp}| \quad (22)$$

jer je u trenutku $\tau=0$, $T_{k1}(\tau)=T_{kp}$.

Iz (21) i (22) dobija se izraz kojim je određen koeficijent prelaza toplote sa odlivka na kalup

$$\alpha = \frac{\lambda_p}{x_p} \frac{T_0(\tau) - T_{kp}}{T_0(\tau) - T_{kms}} \quad (23)$$

Kako se rastopljeni metal uliva u kalup sa temperaturom livenja T_L to prethodni izraz glasi

$$\alpha = \frac{\lambda_p}{x_p} \left(\frac{T_L - T_{kp}}{T_L - T_{kms}} \right) \quad (24)$$

Ovim izrazom određen je koeficijent prelaza toplote α . Kako se T_{kms} malo menja, to se koeficijent prelaza toplote α može uzeti kao konstantna veličina.

4. USLOVI EKSPERIMENTA

Za potrebe eksperimenta napravljen je metalni kalup debljine zida 4 mm, mase $G_k=0,863$ kg. Specifična toplota čelika sa 0,18 - 0,8% C, od koga je izradjen kalup iznosi $c_k=753$ J/kgK. Početna temperatura kalupa iznosi 398 K (125 °C).

Sastav premaza kalupa je sledeći: 5% oksida cinka, 3% vodenog stakla i 92% vode. Koeficijent toplotne provodljivosti premaza navedenog sastava je $\lambda_p=0,192$ W/mK [1]. Debljina premaza $x_p=0,4$ mm.

Livena je legura aluminijum-bakar, sa 4,5% Cu (AlCu4,5). Masa odlivka iznosi $G=0,331$ kg, i ima oblik ploče dimenzija 120x85x14 mm. Temperatura likvidusa legure je $T_{lik}=923$ K, a temperatura solidusa $T_{sol}=843$ K.

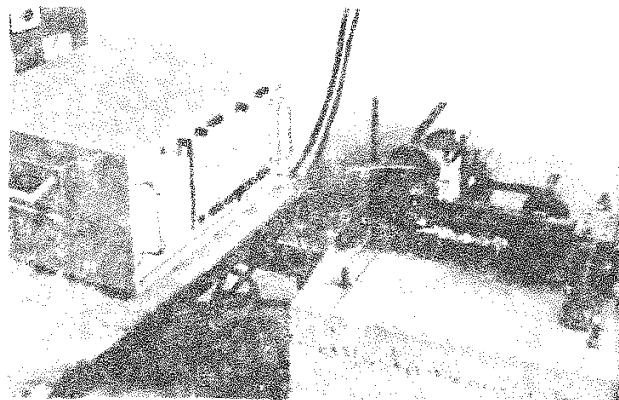
Srednja vrednost specifične toplote kristalizacije $i=385$ KJ/kg. Srednja vrednost specifične toplote legure, u intervalu temperatura kristalizacije, iznosi $c=1156,47$ J/kgK. Temperatura livenja legure $T_L=953$ K, a temperatura okolne sredine $T_s=293$ K.

5. MERENJE TEMPERATURE $T_{k2}(\tau)$

Koeficijent prelaza toplote sistema odlivak-metalni kalup, određen je izrazom (24). Iz izraza se vidi da na veličinu koeficijenta prelaza toplote utiče visina srednje kalorimetrijske temperature T_{kms} . Odredjivanje ove temperature zahteva poznavanje

količine toplote $Q_s(\tau)$ odvedene sa spoljne strane zida kalupa, u sredinu koja ga okružuje. Količina toplote $Q_s(\tau)$ zavisi od temperature spoljne površine kalupa.

Odredjivanje temperature na spoljnom zidu kalupa $T_{k2}(\tau)$ obavljeno je merenjem. U tu svrhu korišćen je termopar NiCr-Ni, prečnika žice $d=0,1$ mm. Termopar je pričvršćen na spoljnu površinu kokile, a promena temperature u periodu očvršćavanja odlivka beležena pisačem "HOTINGER" - svetlosni oscilograf AF8UV, slika 3.



Slika 3.

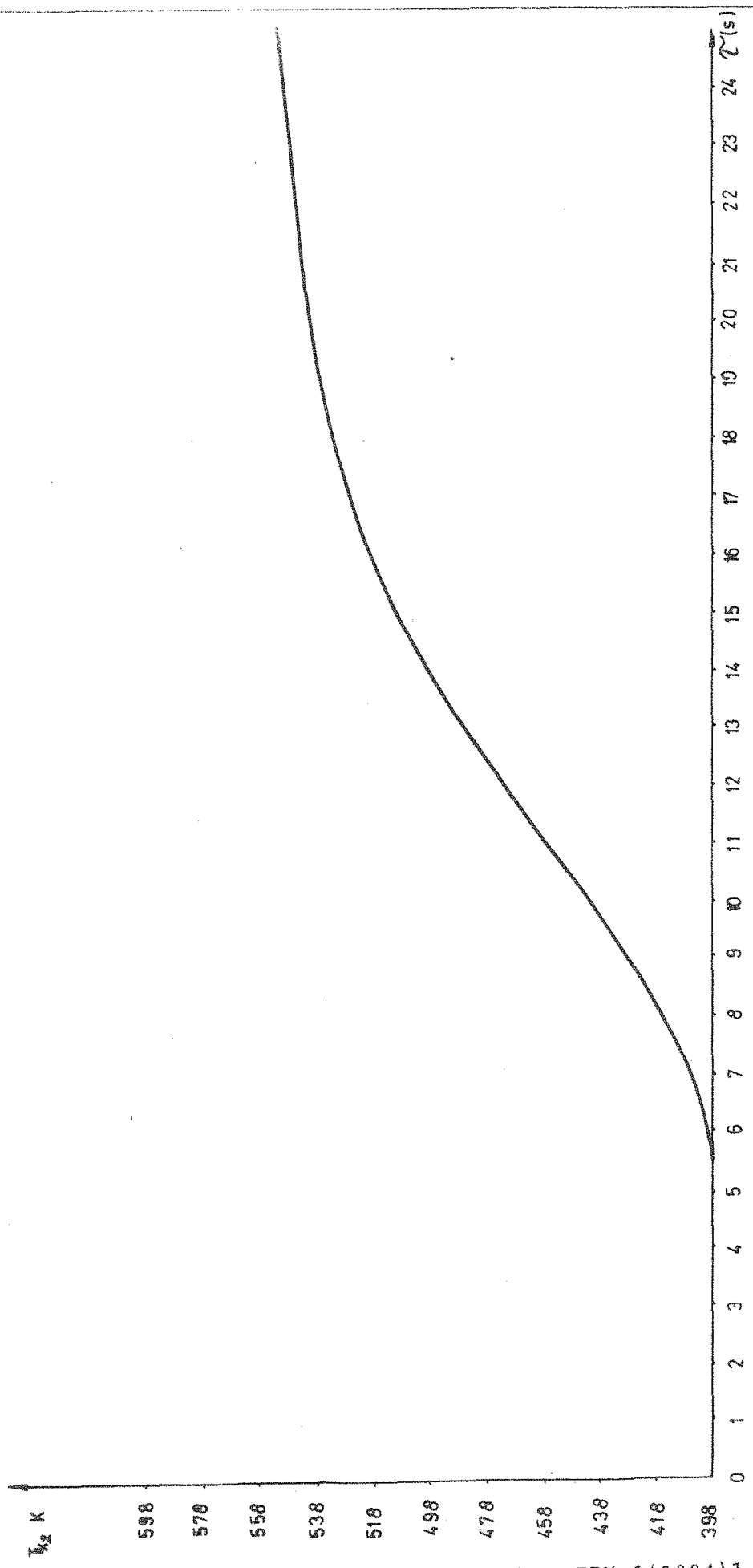
Na slici 4: prikazan je dijagram promene temperature $T_{k2}(\tau)$, po vremenu. Vreme očvršćavanja odlivka odredjeno je eksperimentalnim putem, uranjanjem elektrode u liv. Radi realnijeg odredjivanja ovog vremena obavljeno je više merenja i ono iznosi oko 15 s.

Slika 4 pokazuje karakter promene temperature na spoljnoj površini zida kalupa $T_{k2}(\tau)$ od trenutka ulivanja metala $\tau=0$, do vremena od 25 s. Uočava se da u periodu od oko 5 s nakon ulivanja metala ne dolazi do promene temperature na spoljnoj površini kalupa, a nakog toga vremena ista naglo raste.

6. ODREDJIVANJE VREDNOSTI KOEFICIJENTA PRELAZA TOPLOTE

Nakon ulivanja rastopljenog metala u kalup, temperatura spoljne površine metalnog kalupa se povećava od početne temperature $T_{kp}=398$ K do temperature $T_{k2}(\tau)=510$ K za vremenski period od 15 s.

U tom periodu koeficijent prelaza toplote, sa spoljne površine kalupa u okolnu sredinu, porastao je sa α_2 22 W/m^2K pri tem-



Slika 4.

peraturi $T_{kp}=398$ K na $\alpha_2 \approx 22$ W/m²K pri temperaturi $T_{k2}(\tau)=510$ K, što se vidi sa slike 2. Očigledno je da se sa promenom temperature $T_{k2}(\tau)$ menja i α_2 , te bi za svaku vrednost $T_{k2}(\tau)$ trebalo očitavati α_2 , a zatim odredjivati α . Da bi se ovo izbeglo, uzeće se srednja vrednost α_2 u navedenom intervalu i ona iznosi $\alpha_2=18$ W/m²K.

Količina toplote odvedene sa spoljne površine zida kalupa u okolnu sredinu za vreme od 15 s (od trenutka ulivanja metala do očvršćavanja) odrediće se prema izrazu (13) i za $s_k=0,041$ m² ona iznosi

$$Q_s = 2402,19 \text{ J.}$$

Visina srednje kalorimetrijske temperature odredjuje se prema izrazu (19) i ona iznosi

$$T_{kms} = 725 \text{ K.}$$

Vrednost koeficijenta prelaza toplote sa odlivka na metalni kalup sada se može odrediti prema izrazu (24) i ona iznosi:

$$\alpha = \frac{\lambda_p}{x_p} \left(\frac{T_z - T_{kp}}{T - T_{kms}} \right) = 1168 \text{ W/m}^2\text{K.}$$

Prikazani metod odredjivanja koeficijenta prelaza toplote sistema odlivak-metalni kalup je u nekim elementima uprošćen, ali ipak prihvatljiv za ocenu intenziteta hladjenja odlivka. Vrednost koeficijenta prelaza toplote sa odlivka na kalup odredjuje se za potrebe analitičkih metoda razmatranja procesa očvršćavanja odlivka kao i u pogonskim uslovima za ocenu intenziteta hladjenja i njegovog uticaja na strukturna i mehanička svojstva odlivka.

LITERATURA

- [1] Balandin, G.F.: Osnovy teoriji formirovanija otlivki, Čast-j I, "Mašinstroenie", Moskva, 1976.
- [2] Balandin, G.F.: Osnovy teoriji formirovanija otlivki, Čast-j II, "Mašinstroenie", Moskva 1979.
- [3] Vejniki, A.I.: Teorija zatverdevanija otlivki, "MAŠGIZ", Moskva, 1960.
- [4] Vejniki, A.I.: Rasčet otlivki, "Mašinstroenie", Moskva, 1964.
- [5] Isačenko, V.P., Osipova, V., Sukomel, A.S.: Teploperedatča, "Energija", Moskva, 1975.