

Projektovanje tehnologije termičke obrade

Toplotni proračun peći periodičnog dejstva

Toplotni proračun peći periodičnog dejstva

-određivanje vremena zagrevanja-

Postupak određivanja vremena zagrevanja radnih predmeta se razlikuje za dva slučaja:

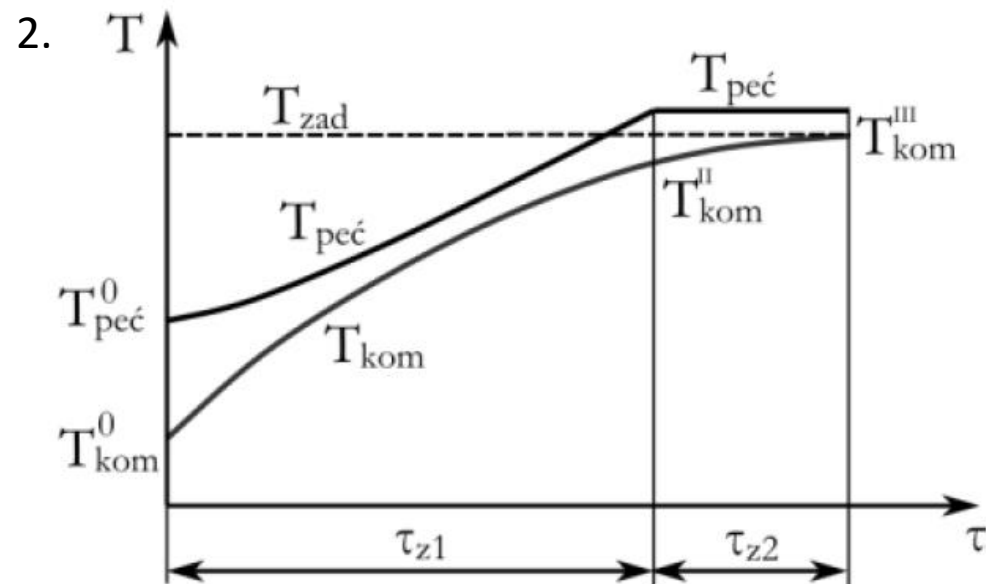
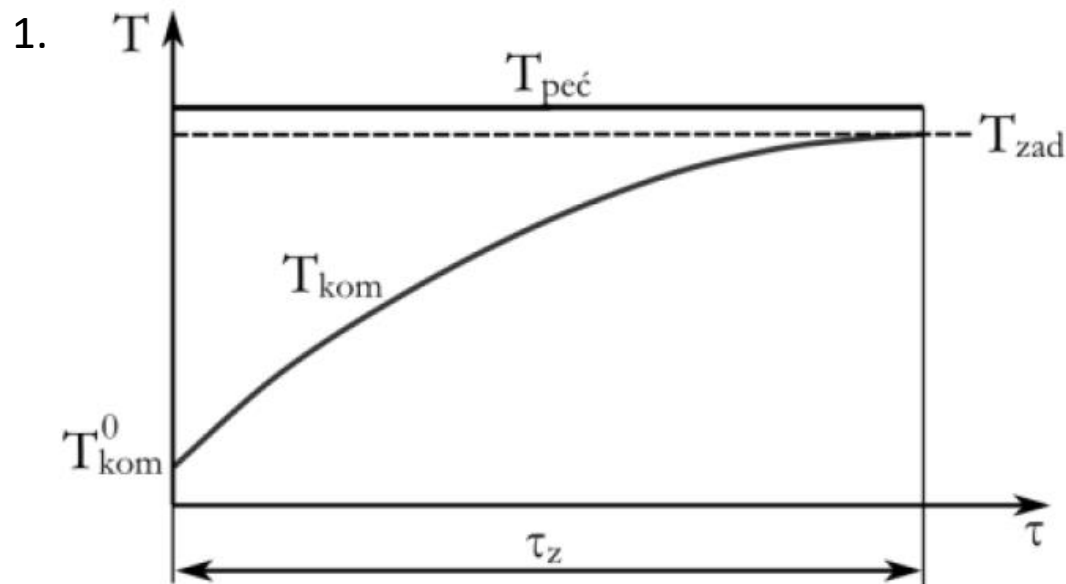
1. Zagrevanje tankih komada kod kojih se pri proračunu unutrašnje temperaturno polje radnog predmeta može zanemariti. U ovom slučaju proračun se vrši metodom koncentrisanih parametara.
2. Zagrevanje masivnih komada kod kojih se temperaturno polje radnog predmeta ne može zanemariti te se moraju primenjivati nešto kompleksniji proračuni.

Kao kriterijum za određivanje tipa proračuna služi Biotov broj. Ukoliko je $Bi < 0,1$ predmet se smatra tankim, dok se za vrednosti $Bi > 0,1$ predmet smatra masivnim.

Zagrevanje tankih komada

Zagrevanje komada se može izvesti na dva načina:

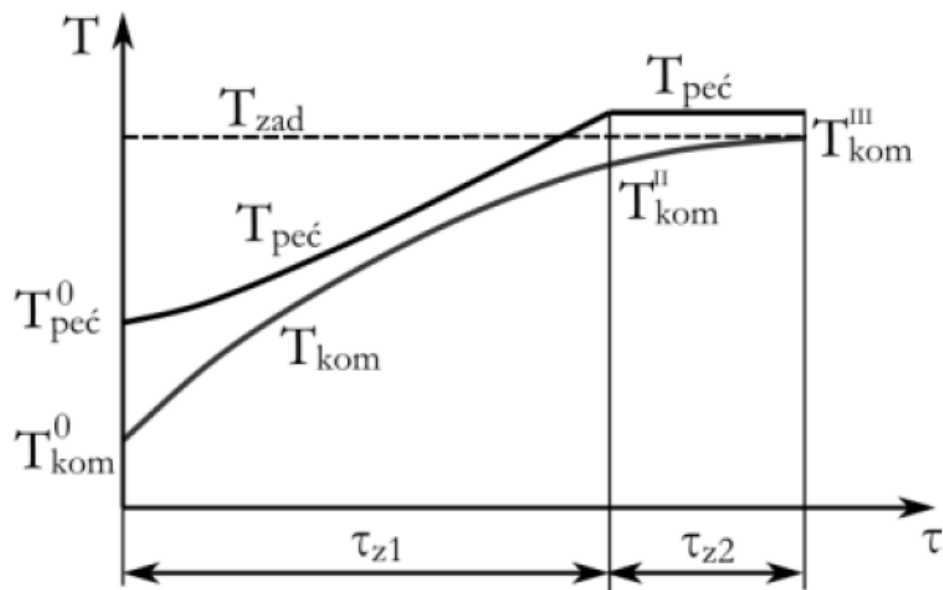
1. Peć se pre šaržiranja predgreje na zadatu temperaturu i ona tokom celog procesa ostaje nepromenjena. Grejači se uključuju samo po potrebi kako bi se nadoknadili toplotni gubici.
2. Na početku ciklusa peć se nalazi na temperaturi nižoj od zadate i u početnom stadijumu ciklusa zagrevanja grejači su neprekidno uključeni kako bi se dostigla zadata temperatura.



Zagrevanje tankih komada

Zagrevanje komada se obično vrši u dve etape:

1. Etapa 1: zagrevanje komada sa konstantnim toplotnim protokom ($q = \text{const.}$). Ova etapa traje do postizanja predviđene temperature peći u kojoj se komadi zagrevaju. Snaga peći se ne menja u ovom periodu. Sva raspoloživa snaga (snaga peći umanjena za gubitke) koristi se zagrevanje komada.
2. Etapa 2: zagrevanje komada sa konstantnom temperaturom peći ($T_{\text{peć}} = \text{const.}$). Ova etapa traje od kraja prethodne etape do postizanja zadate temperature zagrevanja komada. Sa porastom temperature komada opada brzina zagrevanja, a time i snaga potrebna za zagrevanje.

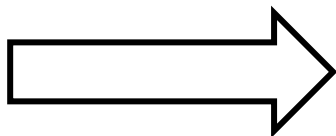


Zagrevanje tankih komada

Vreme potrebno za zagrevanje se može izračunati primenom jednačina:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

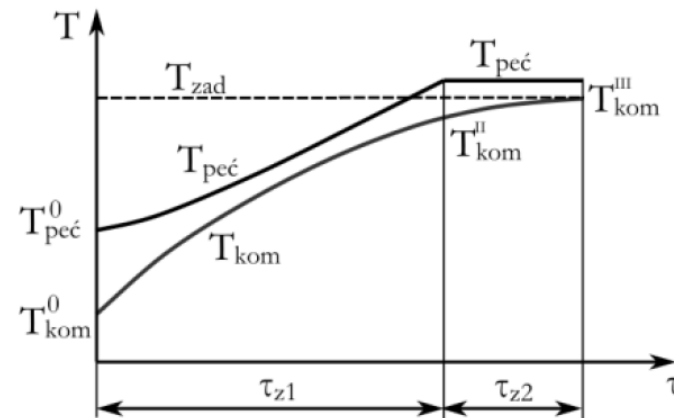
$$q = \frac{\partial Q}{\partial \tau}$$



$$\tau_z = \frac{m \cdot c_p \cdot \Delta T}{q} = \frac{m \cdot c_p \cdot \Delta T}{A_{kom} q''}$$

$$\tau_{z1} = \frac{m \cdot c_p \cdot (T_{kom}^{II} - T_{kom}^0)}{A_{kom} q''_{z1}}$$

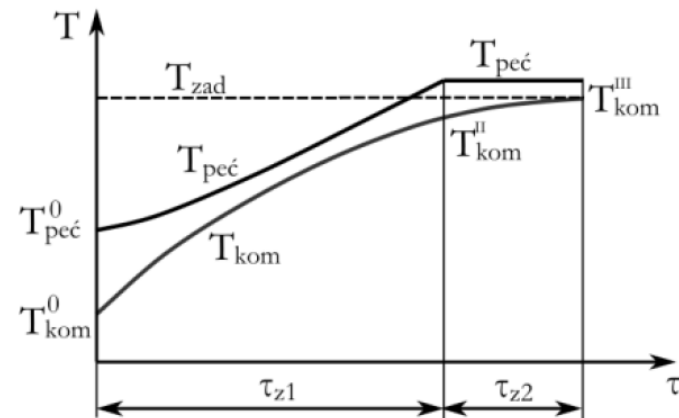
$$\tau_{z2} = \frac{m \cdot c_p \cdot (T_{kom}^{III} - T_{kom}^{II})}{A_{kom} q''_{z2}}$$



Zagrevanje tankih komada

Prva etapa zagrevanja:

$$q''_{z1} = \frac{P_{peć} - P_g}{A_{kom}}$$

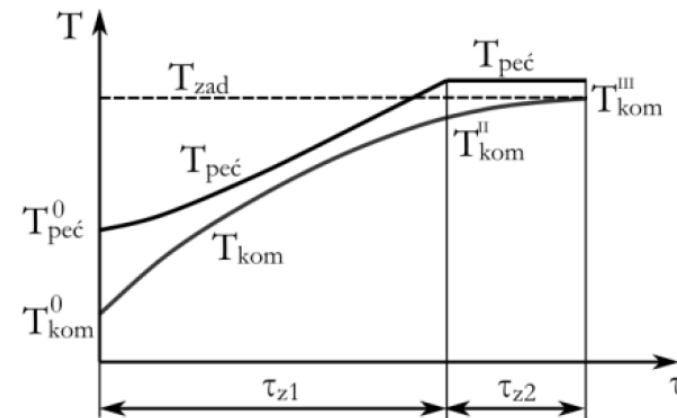


Za potpuno konveksne radne predmete možemo napisati:

$$q''_{z1} = \alpha_{konv} \cdot (T_{peć} - T_{kom}^{II}) + \frac{\sigma \left[(T_{peć} + 273,15)^4 - (T_{kom}^{II} + 273,15)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_{peć}} + \frac{A_{peć}}{A_{kom}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{kom}} - 1 \right)}$$

Zagrevanje tankih komada

Pri proračunima visokotemperaturnih peći, uticaj konvekcije se može zanemariti:

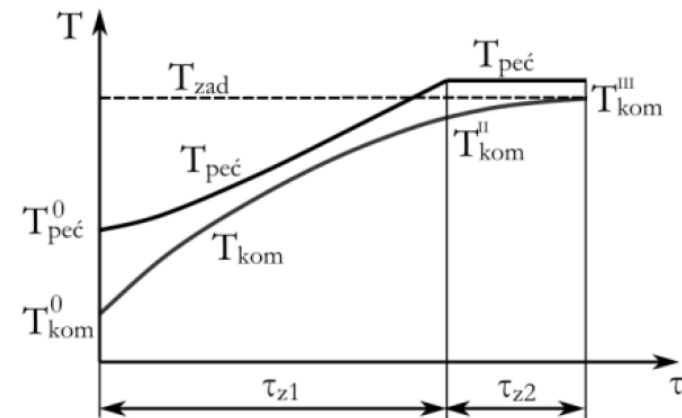


$$q''_{z1} = \cancel{\alpha_{konv} \cdot (T_{peć} - T_{kom}^{II})} + \frac{\sigma \left[(T_{peć} + 273,15)^4 - (T_{kom}^{II} + 273,15)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_{peć}} + \frac{A_{peć}}{A_{kom}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{kom}} - 1 \right)}$$

$$T_{kom}^{II} = \sqrt[4]{(T_{peć} + 273,15)^4 - \frac{q''_{z1} \left(\frac{1}{\varepsilon_{peć}} + \frac{A_{peć}}{A_{kom}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{kom}} - 1 \right) \right)}{\sigma}} - 273,15$$

$$T_{kom}^{II} = (0,8 - 0,95)T_{zad}$$

Zagrevanje tankih komada



$$q''_{z1} = \alpha_{konv} \cdot (T_{peć} - T_{kom}^{II}) + \frac{\sigma \left[(T_{peć} + 273,15)^4 - (T_{kom}^{II} + 273,15)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_{peć}} + \frac{A_{peć}}{A_{kom}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{kom}} - 1 \right)}$$

Ukoliko se ova jednačina zapiše za trenutak šaržiranja:

$$q''_{z1} = \alpha_{konv} \cdot (T_{peć}^0 - T_{kom}^0) + \frac{\sigma \left[(T_{peć}^0 + 273,15)^4 - (T_{kom}^0 + 273,15)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_{peć}} + \frac{A_{peć}}{A_{kom}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{kom}} - 1 \right)}$$

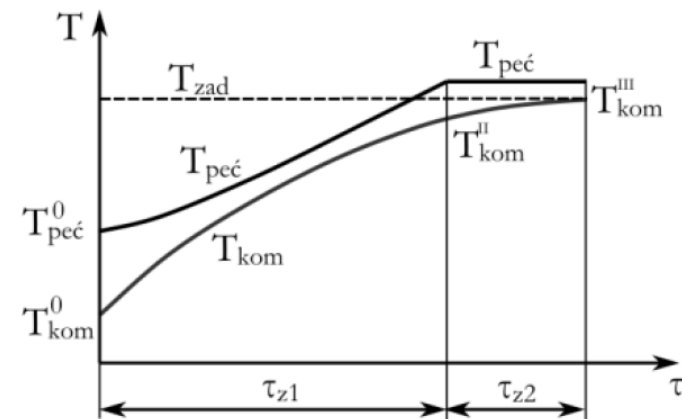
Zagrevanje tankih komada

Vreme etape 2, u slučaju zračenja:

$$dQ = m_{kom} \cdot c_{kom} \cdot dT = \frac{A_{peč} \sigma \left[(T_{peč} + 273,15)^4 - (T_{kom} + 273,15)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_{peč}} + \frac{A_{peč}}{A_{kom}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{kom}} - 1 \right)} d\tau$$

$$\tau_{z2} = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right) \frac{m_{kom} \cdot c_{kom}}{A_{peč} \sigma (T_{peč} + 273,15)^3} \cdot$$

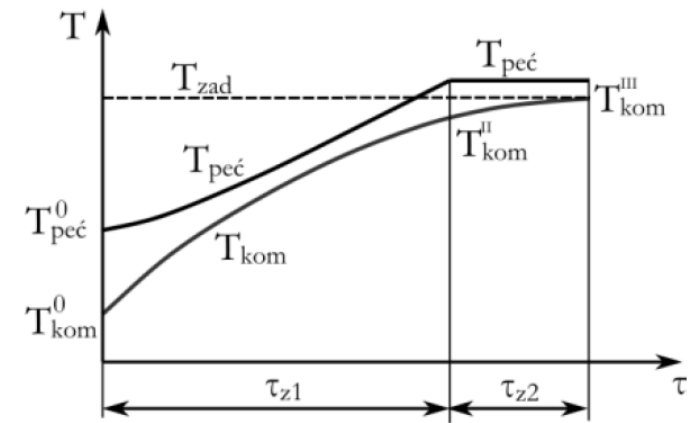
$$\cdot \left(\frac{1}{4} \ln \frac{1 + \frac{(T_{kom}^{III} + 273,15)}{(T_{peč} + 273,15)}}{1 - \frac{(T_{kom}^{III} + 273,15)}{(T_{peč} + 273,15)}} + \frac{1}{2} \arctg \frac{(T_{kom}^{III} + 273,15)}{(T_{peč} + 273,15)} \right. \\ \left. - \frac{1}{4} \ln \frac{1 + \frac{(T_{kom}^{II} + 273,15)}{(T_{peč} + 273,15)}}{1 - \frac{(T_{kom}^{II} + 273,15)}{(T_{peč} + 273,15)}} - \frac{1}{2} \arctg \frac{(T_{kom}^{II} + 273,15)}{(T_{peč} + 273,15)} \right)$$



Zagrevanje tankih komada

Vreme etape 2, u slučaju konvektivnog prenosa toplote:

$$\tau_{z2} = \frac{m_{kom} \cdot c_{kom}}{\alpha \cdot A_{kom}} \cdot \ln \frac{T_{peć} - T_{kom}^{II}}{T_{peć} - T_{kom}^{III}}$$



Zagrevanje tankih komada

Vreme etape 2, u slučaju konvektivnog prenosa toplote:

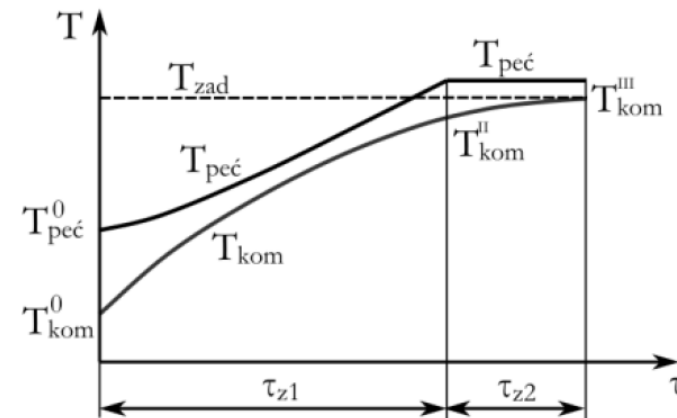
$$\tau_{z2} = \frac{m_{kom} \cdot c_{kom}}{\alpha \cdot A_{kom}} \cdot \ln \frac{T_{peć} - T_{kom}^{II}}{T_{peć} - T_{kom}^{III}}$$

Ukoliko se ne može zanemariti nijedan vid prenosa toplote:

$$\alpha_{zrač} = \frac{\sigma \cdot [(T_{peć} + 273,15)^2 + (T_{kom} + 273,15)^2]}{\frac{1}{\varepsilon_{peć}} + \frac{A_{peć}}{A_{kom}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{kom}} - 1 \right)} \cdot [(T_{peć} + 273,15) + (T_{kom} + 273,15)]$$

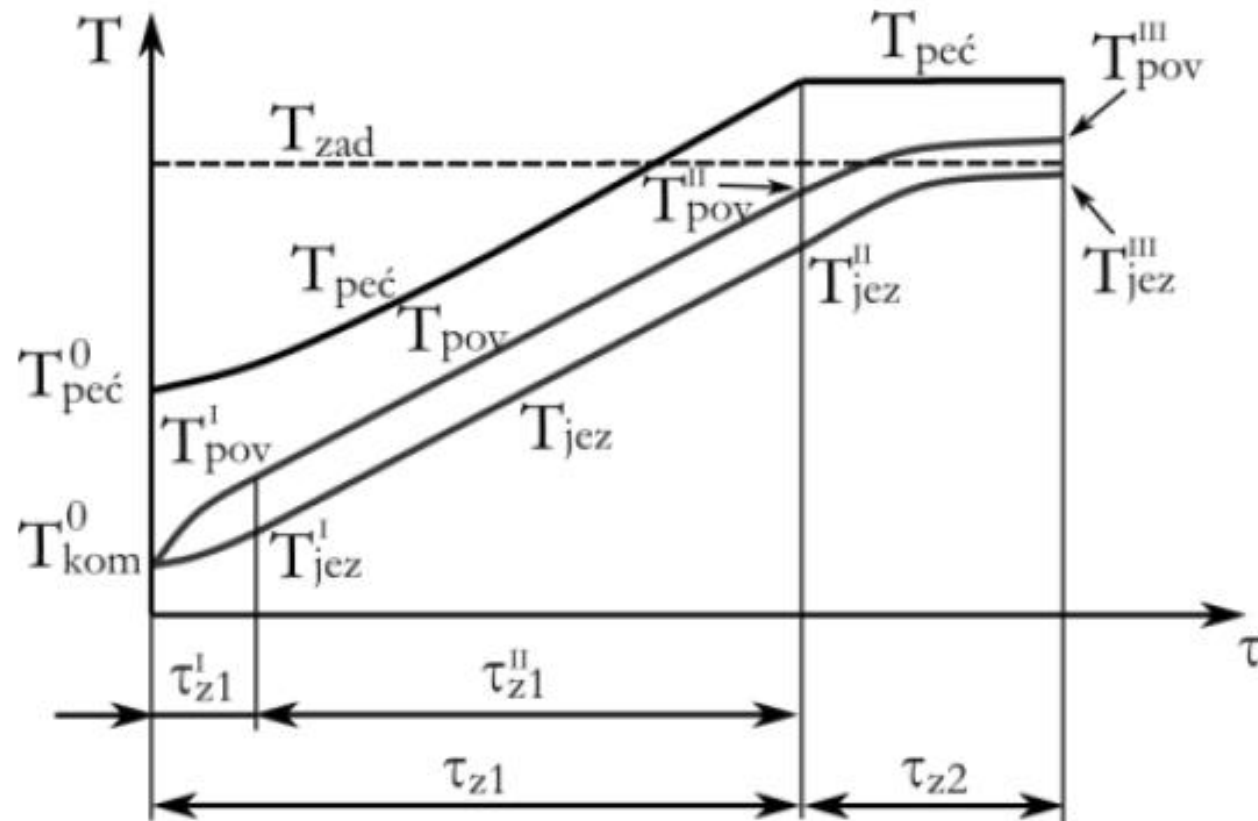
$$\alpha_{zrač} = \frac{\alpha_{zrač}^{II} + \alpha_{zrač}^{III}}{2}$$

$$\alpha_{ukupno} = \alpha_{konv} + \alpha_{zrač}$$



Zagrevanje masivnih komada

Kao i kod tankih radnih predmeta i kod masivnih komada se zagrevanje vrši u barem dve etape. Međutim, u ovom slučaju se temperaturno polje unutar radnog predmeta ne može zanemariti.



$$Fo = \frac{\lambda \tau}{c_p \rho L^2} = \frac{a \tau}{L^2}$$

Zagrevanje masivnih komada

Kao trenutak uspostavljanja regularnog režima pri zagrevanju beskonačne ploče definisan je trenutak kada Furijeov broj dostigne vrednost od 0,3:

$$\tau_{z1}^I = 0,3 \frac{(S/2)^2}{a}$$

gde je S debljina ploče.

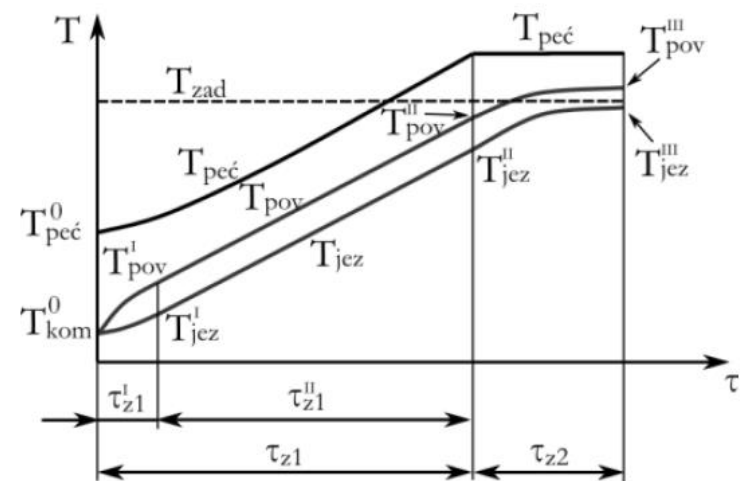
Na sličan način se za beskonačni cilindar poluprečnika R ($Fo = 0,25$) može izvesti da je:

$$\tau_{z1}^I = 0,25 \frac{R^2}{a}$$

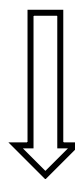
$$Fo = \frac{\lambda \tau}{c_p \rho L^2} = \frac{a \tau}{L^2}$$

Zagrevanje masivnih komada

Tokom zagrevanja radnog predmeta u regularnom režimu, brzina zagrevanja ostaje nepromenjena i jednaka je u svakoј tački radnog predmeta:



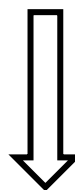
$$\Delta T = T''_{pov} - T'_{pov} = T''_{jez} - T'_{jez} = \text{const.}$$



$$T_{pov} = T_0 + \frac{q'' L}{\lambda} \left(Fo + \frac{1}{3} \right)$$

Za cilindar:

$$T_{pov} = T_0 + \frac{q'' R}{\lambda} \left(2Fo + \frac{1}{4} \right)$$



$$(T_{pov}^{II} - T_{pov}^I) = T_0 + \frac{q''_{z1} L}{\lambda_{kom}} \left(Fo^{II} + \frac{1}{3} \right) - T_0 + \frac{q''_{z1} L}{\lambda_{kom}} \left(Fo^I + \frac{1}{3} \right)$$

$$(T_{pov}^{II} - T_{pov}^I) = \frac{q'' L}{\lambda} (Fo^{II} - Fo^I) = \frac{q''_{z1} L}{\lambda_{kom}} \left(\frac{\lambda_{kom} \tau_{z1}}{c_{kom} \rho_{kom} L^2} - \frac{\lambda_{kom} \tau_{z1}^I}{c_{kom} \rho_{kom} L^2} \right)$$

Zagrevanje masivnih komada

Vreme trajanja drugog dela prve etape pri zagrevanju beskonačne ploče iznosi:

$$\tau_{z1}^{\text{II}} = \frac{(T_{pov}^{\text{II}} - T_{pov}^{\text{I}}) \cdot S \cdot \rho_{kom} \cdot c_{kom}}{2q_{z1}''}$$

Za slučaj beskonačnog cilindra:

$$\tau_{z1}^{\text{II}} = \frac{(T_{pov}^{\text{II}} - T_{pov}^{\text{I}}) \cdot R \cdot \rho_{kom} \cdot c_{kom}}{2q_{z1}''}$$

Zagrevanje masivnih komada

Za određivanje vremena zagrevanja neophodno je poznavanje toplotnog protoka prve faze zagrevanja. On se može odrediti na isti način kako je to urađeno u slučaju tankog komada.

Međutim postoji dodatni uslov, iz jednačina:

$$\text{Ploča: } \Delta T = \frac{q'' L}{2\lambda}$$

$$\text{Cilindar: } \Delta T = \frac{q'' R}{2\lambda}$$

Može se napisati:

$$\text{Ploča: } q''_{z1} \leq \frac{4\lambda\Delta T_{maks}}{S}$$

$$\text{Cilindar: } q''_{z1} \leq \frac{2\lambda\Delta T_{maks}}{R}$$

Zagrevanje masivnih komada

Nakon što u prvoj fazi zagrevanja peć dostigne zadatu temperaturu, uključuje se termostatski koji održava temperaturu nepromenljivom čime se menjaju granični uslovi. Vreme druge faze zagrevanja se može odrediti uz pomoć Furijeovog broja:

$$\tau_{z2} = \frac{Fo \cdot L^2}{a}$$

$$Fo = \frac{\lambda \tau}{c_p \rho L^2} = \frac{a \tau}{L^2}$$

Furijski broj može se odrediti iz sledećih jednačina:

$$Bi = \frac{\alpha L}{\lambda}$$

Beskonačni ravan zid:

$$\theta = a_2 e^{-a_1^2 Fo} \cdot \cos(a_1 x^*)$$

Beskonačni cilindar:

$$\theta = a_2 e^{-a_1^2 Fo} \cdot J_0(a_1 x^*)$$

Sfera:

$$\theta = a_2 e^{-a_1^2 Fo} \cdot \frac{\sin(a_1 x^*)}{a_1 x^*}$$

$$Fo = \frac{\ln(J_0(a_1) \cdot a_2 / \theta_{pov})}{a_1^2}$$

Koeficijenti J_0 , a_1 i a_2 očitavaju se iz tabela, uz pomoć Biovog broja. Za određivanje Biovog broja koristi se koeficijent prenosa toplote (slajd 11) gde se umesto srednje temperature komada uzima temperatura površine.

Zagrevanje masivnih komada

Temperaturni kriterijum se računa na sledeći način:

$$\theta_{pov} = \frac{T_{peć} - T_{pov}^{III}}{T_{peć} - T_{sr}^{II}}$$

Gde se T_{sr} računa kao:

Beskonačni ravan zid:

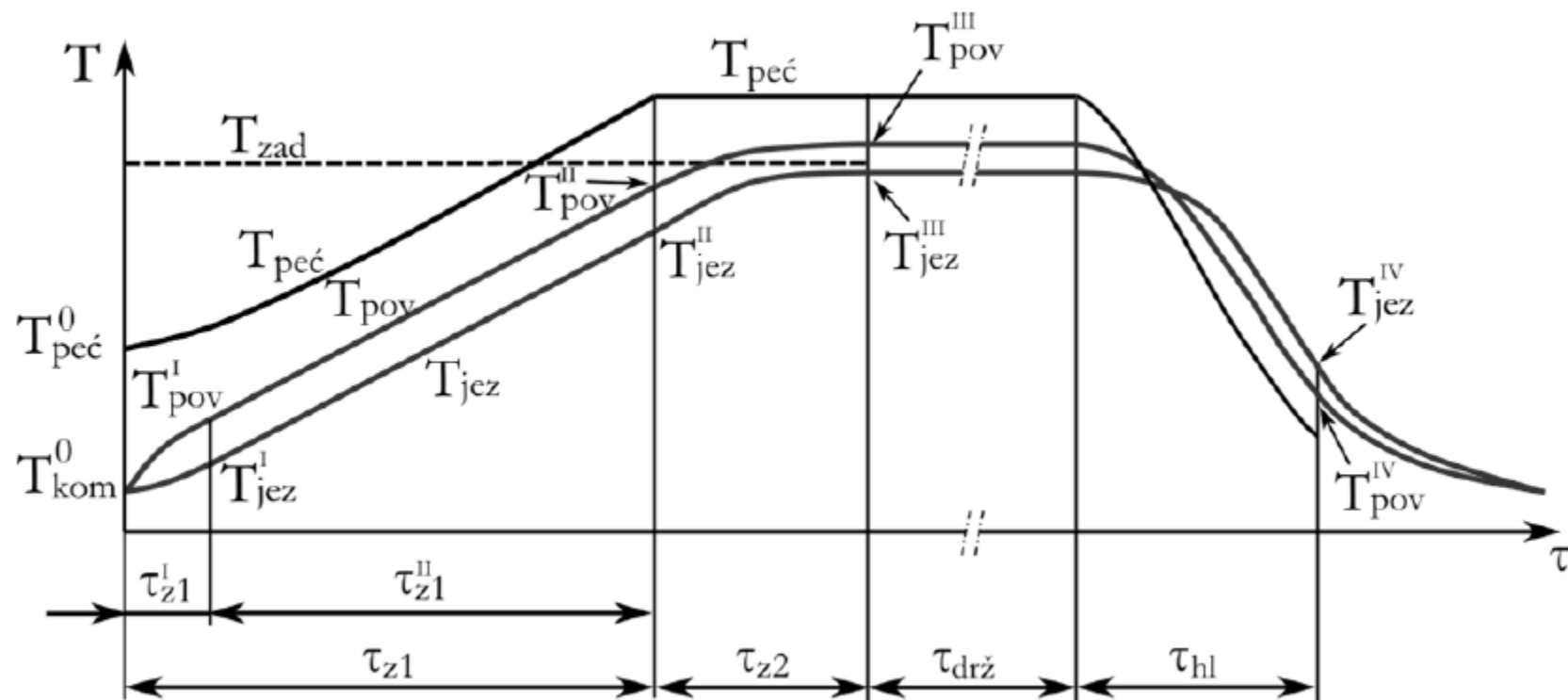
$$T_{sr}^{II} = T_{pov}^{II} - 0,7\Delta T$$

Beskonačni cilindar:

$$T_{sr}^{II} = T_{pov}^{II} - 0,6\Delta T$$

Tehnologijom termičke obrade radnog predmeta uvek se zadaje i maksimalna dozvoljena temperaturna razlika na kraju procesa zagrevanja. U slučaju da je proračunom dobijena veća razlika od dozvoljene, neophodno je smanjiti ciljanu temperaturu peći kako bi se usporio proces zagrevanja i time ostavilo dovoljno vremena za izjednačavanje temperature po preseku radnog predmeta. Nakon toga se ponavlja celokupan proračun zagrevanja.

Određivanje vremena hlađenja



Određivanje vremena hlađenja

Toplotni gubici najveći na početku hlađenja, kada je najveća temperatura unutar komore najviša, i do kraja hlađenja se neprekidno smanjuju. Zbog toga se pri proračunu hlađenja uzima u obzir srednja vrednost toplotnih gubitaka:

$$\overline{q_g} = \frac{q_g^{\text{III}} + q_g^{\text{IV}}}{2}$$

Odavde proizilazi da je vreme hlađenja jednako:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$$\tau_{hl} = \frac{Q_{ak}^{\text{III}} - Q_{ak}^{\text{IV}}}{\overline{q_g}}$$

Gde su Q_{ak}^{III} i Q_{ak}^{IV} ukupna akumulirana toplota unutar sistema na početku i na kraju hlađenja.

Kod novijih peći ozid je često napravljen samo od izolacionih vunenih vlakana koji imaju minimalnu akumuliranu toplotu. U tom slučaju se može desiti da je i prilikom hlađenja potrebno koristiti grejače.

Određivanje vremena hlađenja

Toplotni gubici sistema na početku hlađenja jednaki su zbiru toplotnih gubitaka svake pojedinačne komponente sistema. Na sličan način možemo odrediti akumulisanu toplotu sistema kao zbir akumuliranih toplota pojedinačnih komponenti sistema čemu ćemo dodati akumulisanu toplotu u komadu i u pomoćnim elementima, ukoliko se i oni hlade zajedno sa peći.

$$q_g^{\text{III}} = q_{g-z}^{\text{III}} + q_{g-d}^{\text{III}} + q_{g-p}^{\text{III}}$$

$$Q_{ak}^{\text{III}} = Q_{ak-z}^{\text{III}} + Q_{ak-d}^{\text{III}} + Q_{ak-p}^{\text{III}} + Q_{ak_{kom+pom}}^{\text{III}}$$

Da bi se odredili toplotni gubici i akumulirana toplota sistema na kraju hlađenja uvešće se dodatno uprošćenje problema tako što će se pretpostaviti da su akumulirana toplota i toplotni protok direktno proporcionalni unutrašnjoj temperaturi peći.

$$q_g^{\text{IV}} \cong q_g^{\text{III}} \frac{T_{\text{peć}}^{\text{IV}}}{T_{\text{peć}}^{\text{III}}}$$

$$Q_{ak}^{\text{IV}} \cong Q_{ak}^{\text{III}} \frac{T_{\text{peć}}^{\text{IV}}}{T_{\text{peć}}^{\text{III}}}$$

Određivanje ukupnog utroška toplote

Toplota se u toku jednog ciklusa koristi za zagrevanje radnih predmeta i pomoćnih elemenata, kao i za pokrivanje svih gubitaka:

$$Q_{uk} = Q_k + Q_p + Q_{gd} + Q_{gz} + Q_{ghl} + Q_{gs} + Q_{ov}$$

Gde su:

Q_k - korisna toplota za zagrevanje komada

Q_p - pomoćna toplota

Q_{gd} - utrošak toplote tokom držanja

Q_{gz} - utrošak toplote tokom zagrevanja

Q_{ghl} - utrošak toplote u toku hlađenja u peći

Q_{gs} - utrošak toplote tokom stajanja

Q_{ov} - utrošak toplote kroz otvorena vrata

Određivanje ukupnog utroška toplote

Korisna i pomoćna toplota se proračunavaju na osnovu jednačina:

$$Q_k = m_{kom} \cdot c_{kom} \cdot (T_{kom}^{III} - T_{kom}^0)$$

$$Q_p = m_{pom} \cdot c_{pom} \cdot (T_{pom}^{III} - T_{pom}^0) + m_{gas} \cdot c_{gas} \cdot (T_{gas}^{III} - T_{gas}^0)$$

Gde su:

m_{pom} - masa pomoćnih elemenata ($m_{pom} = 0,1m_{kom}$)

m_{gas} - masa gasa unutar peći

Korisna i pomoćna toplota su jednaki ukupnoj toploti akumuliranoj u radnom predmetu i pomoćnim elementima:

$$Q_k + Q_p = Q_{ak_{kom}+pom}^{III}$$

Određivanje ukupnog utroška toplote

Utrošak toplote tokom zagrevanja proračunava se na osnovu jednačine:

$$Q_{g_z} = \overline{q_{gz}} \cdot \tau_z = \overline{q_{gh}} \cdot \tau_z$$

Gde su:

$\overline{q_{gz}} = \overline{q_{gh}}$ – srednji gubici u toku zagrevanja/hlađenja

Određivanje ukupnog utroška toplote

Utrošak toplote tokom hlađenja predstavlja razliku između akumulisane toplote u oblozi na početku i na kraju hlađenja:

$$Q_{g_{hl}} = Q_{ak_{ob}}^{III} - Q_{ak}^{IV}$$

Određivanje ukupnog utroška toplote

Utrošak toplote tokom stajanja proračunava se na osnovu jednačine:

$$Q_{g_s} = q_g^{IV} \cdot \tau_s$$

Gde su:

q_g^{IV} – toplotni gubici na kraju hlađenja

τ_s – vreme stajanja peći

Određivanje ukupnog utroška toplote

Utrošak toplote kroz otvorena vrata proračunava se na osnovu jednačine:

$$Q_{ov} = \tau_{ov} \cdot q_{up \rightarrow otv} = \frac{\tau_{ov} \sigma \left[(T_{peć} + 273,15)^4 - (T_{otv} + 273,15)^4 \right]}{\frac{1 - \varepsilon_{peć}}{\varepsilon_{peć} A_{up}} + \frac{1}{A_{up} F_{up \rightarrow otv}} + \frac{1 - \varepsilon_{otv}}{\varepsilon_{otv} A_{otv}}}$$

Gde su:

- τ_{ov} – vreme tokom kojeg su vrata otvorena
- $q_{up \rightarrow otv}$ – toplotni protok između unutrašnjosti peći i otvora vrata
- T_{otv} – temperatura peći na kojoj su vrata otvorena
- A_{up} – površina unutrašnjosti peći
- A_{otv} – površina otvora vrata
- $F_{up \rightarrow otv}$ – faktor viđenja između unutrašnjosti peći i otvora vrata

Određivanje potrebne snage grejača

Potrebna snaga grejača određuje se pomoću:

$$P_{peć} = k \frac{Q_k + Q_p + Q_{gz} + Q_{ghl} + Q_{ov}}{\tau_z} [kW]$$

Gde je k koeficijent sigurnosti koji uzima u obzir starenje toplotne izolacije tokom vremena i greške proračuna. Obično se uzima vrednost između 1,2 i 1,5.

Ključni indikatori performansi

Ključni indikatori performansi su merljive vrednosti koji pokazuju efikasnost nekog preduzeća ili procesa u postizanju zadatog cilja.

Kao jedan od osnovnih parametara procesa termičke obrade uzima specifična potrošnja energije koja govori o utrošenoj energiji po jednom kilogramu gotovog proizvoda:

$$\hat{Q} = \frac{Q_{uk}}{m_{kom}} \left[\frac{kW}{t} \right]$$

Još jedan često korišćen parametar za procenu kvaliteta peći i procesa jeste koeficijent korisnog dejstva koji iznosi:

$$\eta_t = \frac{Q_k}{Q_{uk}}$$

Primer projektovanja peći

Primer 5.1

Potrebno je projektovati električnu peć za zagrevanje čeličnog vratila prečnika 400 mm i dužine 2.000 mm. Vratila se u vertikalnom položaju zagrevaju do temperature 950 ± 10 °C, a zatim sporo hlade u peći ne brže od 10 °C/h. Vratila se vade iz peći nakon što temperatura padne ispod 650 °C. U periodu zagrevanja temperaturna razlika u vratilu ne sme da pređe vrednost od 50 °C. Koeficijent provođenja toplote materijala vratila je 41,9 W/m°C, specifični toplotni kapacitet $0,63 \cdot 10^3$ J/kg°C, a gustina 7.800 kg/m³. Potrebno je termički obraditi 2 vratila svake nedelje. Lokalni proizvođač izrađuje ovu vrstu peći sa toplotnom izolacijom sačinjenom od dva sloja debljine po 240 mm. Prvi sloj se izrađuje od lake izolacione vatrostalne opeke NOVASIL L-125, a drugi od diјatomitne opeke MAGMA KPD 350 sledećih osobina: $\lambda_D = 0,085 + 0,00008 \cdot T$; $c_D = 840$ J/kg°C; $\rho_D = 350$ kg/m² i maksimalne radne temperature od 900 °C. Poklopac peći bi bio debljine 500 mm i izrađen iz dva dela, radnog sloja opeke NOVASIL L-125 debljine 115 mm i ostatak bi bila ispunjena od izolacione vune Kaowool S 64 kg/m³. Dati mišljenje o predloženoj izolaciji peći.