

Návrh a výpočet výhrevných článkov pre komorovú odporovú pec

Z tepelného výpočtu a zadaných parametrov využijeme:

- stupeň čiernosti vsádzky: 0,82
- konečnú teplotu ohrevu vsádzky: 800 °C
- priemernú teplotu pecnej komory: 850 °C
- aktívny povrch pracovnej komory (vnútorný povrch pre uloženie výhrevných článkov
 $A_{akt} = A_x + A_y + A_z = 2 \cdot (0,6 \cdot 0,6) + 2 \cdot (0,6 \cdot 0,6) + 2 \cdot (0,6 \cdot 0,6) = 2,16 \text{ m}^2$)
- skutočný príkon pece 63 kW, príkon na fázu 21 kW

Predmetná vsádzka patrí do triedy strednetplotných, ktorej vyhovujú kovové výhrevné články. Predbežne zvolíme materiál CRONIX, vyhovujúci do pracovných teplôt 1250 °C.

Jeho ďalšie parametre sú:

- stupeň čiernosti: $e_{\varepsilon} = 0,8 \div 0,9$
- rezistencia pri 1000 °C: $r_{\varepsilon} = 1,15 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$
- merná hmotnosť: $r_h = 8400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Povrchová teplota článkov pri zachovaní dostatočnej životnosti by nemala prevyšovať konečnú teplotu vsádzky o viac ako 100 °C. Vo výpočte preto budeme ďalej uvažovať s pracovnou teplotou článkov 900 °C. Tejto potom zodpovedá.

a) ideálne merné povrchové zaťaženie absolútne čierneho článku a vsádzky ($e_{\varepsilon} = e_{vs} = 1$)

$$w_{id,0} = s \cdot (T_{cl}^4 - T_{vs}^4) = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot [(900 + 273)^4 - (800 + 273)^4] = 32184 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

b) ideálne merné povrchové zaťaženie reálneho článku a vsádzku ($e_{\varepsilon} = 0,85$, $e_{vs} = 0,82$)

$$w_{id,s} = \frac{1}{\frac{1}{e_{\varepsilon}} + \frac{1}{e_{vs}} - 1} \cdot w_{id,0} = \frac{1}{\frac{1}{0,85} + \frac{1}{0,82} - 1} \cdot 32184 = 23055 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

c) skutočné merné povrchové zaťaženie článku

c1) orientačne: $w_{\varepsilon} = w_{id,s} \cdot j$

kde j je súčiniteľ zohľadňujúci uloženie článkov na povrchu pracovnej komory,

- napr.: - pre uloženie v žľaboch na bočných stenách: $j = 0,75$
- pre uloženie v drážkach stropu a dna: $j = 0,45$

Pretože v navrhovanej peci predpokladáme ohrev zo všetkých stien symetricky, zvolíme pre 4 bočné steny $j = 0,75$ a pre uloženie článkov v strope a dne pece zvolíme $j = 0,45$ (dno predpokladáme netienené). Potom

$$w_{\varepsilon} = \frac{4}{6} \cdot 0,75 \cdot w_{id,s} + \frac{2}{6} \cdot 0,45 \cdot w_{id,s} = 23055 \cdot \left(\frac{4}{6} \cdot 0,75 + \frac{2}{6} \cdot 0,45 \right) = 14986 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

c2) presnejšie

$$w_{\varepsilon} = w_{id,s} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$$

kde k_1 je koeficient závislý od tvaru špirály alebo meandra. Ak sa rozhodneme pre meander obdĺžnikového prierezu, je pre optimálny pomer jeho stúpania (kroku) k šírke pásu $(h/2h)_{opt} = 1,5 \div 3$, volíme 1,6 a koeficient $k_1 = 0,56$

k_2 je koeficient zohľadňujúci rozmiestnenie článkov v peci, $k_2 = f(A_{vs} / A_{akt})$, kde A_{vs} je povrch vsádzky vystavený pôsobeniu článkov, A_{akt} je vnútorný povrch stien pece (aktívna plocha), na ktorom sú uložené články. Pre náš prípad je

$$k_2 = \frac{A_{vs}}{A_{akt}} = \frac{6 \cdot (0,4 \cdot 0,4)}{6 \cdot (0,6 \cdot 0,6)} = 0,44 \cong 0,5$$

čomu zodpovedá $k_2 = 0,64$

k_3 je koeficient zohľadňujúci skutočný vzájomný súčiniteľ sálenia, t.j.

$$\frac{1}{k_3} = \frac{\frac{1}{e_{\xi}} + \frac{A_{vs}}{A_{akt}} \cdot \left(\frac{1}{e_{vs}} - 1 \right)}{\frac{1}{e_{\xi}} + \frac{1}{e_{vs}} - 1} = \frac{\frac{1}{0,85} + \frac{6 \cdot (0,4 \cdot 0,4)}{6 \cdot (0,6 \cdot 0,6)} \cdot \left(\frac{1}{0,82} - 1 \right)}{\frac{1}{0,85} + \frac{1}{0,82} - 1} = 0,913$$

$$k_3 = 1,0957$$

potom

$$w_{\xi} = w_{id,s} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 = 23055 \cdot 0,56 \cdot 0,5 \cdot 1,0957 = 7073 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Za skutočné merné povrchové zaťaženie zvolíme hodnotu $7073 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. S touto hodnotou budeme počítať pre všetky steny, hoci vieme, že na bočných stenách môžeme výhrevné články zaťažiť približne o 40 % väčším výkonom ako výhrevné články uložené na stope a dne.

Výpočet rozmerov a hmotnosti výhrevného článku na jednu vetvu

Počítame skupinu článkov pre príkon $P_{\xi} = 21 \text{ kW}$ (1 fáza), napätie 400 V a $w_{\xi} = 7073 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Rozhodli sme sa pre meander obdĺžnikového prierezu, potom:

- hrúbka pásu pre $(b/a)_{opt} = m = 10$, bude:

$$a = \sqrt[3]{\frac{r_{\xi} \cdot P_{\xi}^2}{2 \cdot (m+1) \cdot m \cdot U^2 \cdot w_{\xi}}} = \sqrt[3]{\frac{1,15 \cdot 10^{-6} \cdot (21 \cdot 10^3)^2}{2 \cdot (10+1) \cdot 10 \cdot 400^2 \cdot 7073}} = 1,268 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

zaokrúhlime na normalizovanú hrúbku $a = a_n = 1,2 \text{ mm}$

- šírka pásu $b = m \cdot a = 10 \cdot 1,2 = 12 \text{ mm}$, zaokrúhlime na normalizovanú šírku $b = b_n = 10 \text{ mm}$

- dĺžka pásu na 1 fázu (1 vetvu trojuholníka):

$$l = \sqrt[3]{\frac{P_{\xi} \cdot U^2 \cdot m}{4 \cdot (m+1)^2 \cdot r_{\xi} \cdot w_{\xi}^2}} = \sqrt[3]{\frac{21 \cdot 10^3 \cdot 400^2 \cdot 10}{4 \cdot (10+1)^2 \cdot 1,15 \cdot 10^{-6} \cdot 7073^2}} = 106,5 \text{ m}$$

alebo

$$l = \frac{U^2 \cdot a \cdot b}{r_{\xi} \cdot P_{\xi}} = \frac{400^2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{1,15 \cdot 10^{-6} \cdot 21 \cdot 10^3} = 79,5 \text{ m}$$

Dĺžku pásu 1 vetvy zvolíme $l_{vetva} = 100 \text{ m}$.

- hmotnosť drôtu 1 vetvy:

$$m_v = r_h \cdot l_{vetva} \cdot a \cdot b = 8400 \cdot 100 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 10,08 \text{ kg}$$

Výpočet tvaru meandra

Pri výpočte tvaru musíme predovšetkým zvažovať veľkosť plochy, na ktorej majú byť meandre uložené. Pretože rozmery pracovnej komory vzhľadom na vsádzku sme volili čo najmenšie (aby sme znížili tepelné straty) a články majú byť umiestnené len na dne a v strope pece, tieto okolnosti nás nútia voliť nižšie uvedené koeficienty na dolnej hranici optimálnej hodnoty, menovite:

a) *koeficient zakrivenia meandra* – je pomer polomeru zakrivenia meandra k hrúbke pásu, t.j.

$$k_1 = \frac{R}{a}, \text{ pričom podľa odporúčaní fy KANTHAL je } k_{1,opt} = 4 \div 5$$

Zvolíme $k_1 = 4$.

b) *koeficient zvlňenia meandra* – je pomer strednej šírky meandra k šírke pásu, t.j.

$$k_2 = \frac{B_{str}}{b}, \text{ pričom podľa odporúčaní fy KANTHAL je } k_{2,opt} = 2 \div 3$$

Zvolíme $k_2 = 2$.

Pomocou týchto koeficientov a predchádzajúcich výsledkov ďalej vypočítame:

- *polomer zakrivenia meandra:*

$$R = k_1 \cdot a = 4 \cdot 1,2 = 4,8 \text{ mm}$$

- *strednú šírku meandra:*

$$B_{str} = k_2 \cdot b = 2 \cdot 10 = 20 \text{ mm}$$

- *dĺžku jednej vlny meandra:*

$$l_v = 2 \cdot (B_{str} - 2 \cdot R) + 2 \cdot p \cdot R = 2 \cdot B_{str} + 2,28 \cdot R = 2 \cdot 20 + 2,28 \cdot 4,8 = 50,94 \cong 51 \text{ mm}$$

- *počet vln meandra:*

$$n = \frac{l}{l_v} = \frac{100}{51 \cdot 10^{-3}} \cong 1961 \text{ vln}$$

- *stúpanie (krok) meandra:*

$$h = 4 \cdot R = 4 \cdot 4,8 = 19,2 \text{ mm}$$

- *celková (aktívna) dĺžka meandra jednej vetvy:*

$$L = n \cdot h = 1961 \cdot 19,2 \cdot 10^{-3} = 37,65 \text{ m}$$

Pre vytváranie tvaru meandra vypočítaných rozmerov je potrebné vytvoriť formu

- *s vnútornou šírkou:* $B_{vn} = B_{str} - a = 20 - 1,2 \cong 19 \text{ mm}$

- *s vonkajšou šírkou:* $B_{vo} = B_{str} + a = 20 + 1,2 \cong 21 \text{ mm}$

Uloženie meandrov do pracovnej komory pece

Zo zadaných rozmerov poznáme vnútorné rozmery pracovnej komory $x = y = z = 0,6 \text{ m}$. Potom na 1 vnútornú stenu výmurovky môžeme uložiť meander s aktívnou dĺžkou:

- *pre dno a strop:*

$$\frac{x}{B_{vo}} \cdot y = \frac{0,6}{21 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,6 = 17 \text{ m}$$

- *pre prednú a zadnú stenu:*

$$\frac{x}{B_{vo}} \cdot z = \frac{0,6}{21 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,6 = 17 \text{ m}$$

- pre bočné steny:

$$\frac{y}{B_{vo}} \cdot z = \frac{0,6}{21 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,6 = 17 \text{ m}$$

Podľa zadania úlohy sa jedná o symetrický ohrev vo všetkých smeroch, t.j. máme uložiť výhrevné články na 6 vnútorných stien pece výmurovky. Na tieto steny môžeme spolu umiestniť meander s celkovou aktívnou dĺžkou:

$$L_{real} = 2 \cdot \left(\frac{x}{B_{vo}} \cdot y + \frac{x}{B_{vo}} \cdot z + \frac{y}{B_{vo}} \cdot z \right) = 2 \cdot (17 + 17 + 17) = 102 \text{ m}$$

Dĺžka meandra, ktorý potrebujeme umiestniť dovnútra (uvažujeme už 3 fázy):

$$L_{vyp} = 3 \cdot L = 3 \cdot 37,65 = 112,95 \text{ m}$$

Z výsledku je vidieť, že úvodnú požiadavku uloženia výhrevných článkov na uvažované steny vnútornej výmurovky pece nevieme splniť. Alternatívne môžeme postupovať takto:

a) ponechať články typu CRONIX s tým, že by sme umiestnili zvyšnú časť meandra na stenu, ktorá je voľná. Navrhovaná zmena v usporiadaní výhrevných článkov spôsobí skrátenie doby ohrevy vsádzky (viacstranný ohrev) s dopadom na zníženie tepelných strát do okolia a zvýšenie výrobnosti pece. Keďže táto alternatíva je za hranicou našich konštrukčných možností a momentálne nevieme umiestniť zvyšnú časť meandra do 4. rozmeru, túto alternatívu neuvažujeme.

b) trvať na pôvodnej požiadavke uloženia výhrevných článkov, ale pôvodne zvolený materiál CRONIX nahradiť kvalitnejším, t.j. najmä s vyššou rezistivitou a vyššou hodnotou dovoleného merného povrchového zaťaženia. Týmto požiadavkám vyhovujú odporové výhrevné materiály fy KANTHAL. Ak sa rozhodneme pre túto alternatívu, z ponúkaného sortimentu vyhovuje materiál KANTHAL DS, s fyzikálnymi vlastnosťami:

- max. prípustná teplota: 1150 – 1200 °C
- rezistencia: $r_{\xi} = 1,35 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$
- merná hmotnosť: $r_h = 7250 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Stupeň čierosti v katalógu fy KANTHAL nebol udaný, preto merné povrchové zaťaženie určíme graficky, t.j. pre teplotu 850 °C je

$$w_{\xi} \cong 20000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Rozmery pásového meandra a jednej vetvy

Volíme $(b/a)_{opt} = m = 10$, potom je

- hrúbka pásu jednej vetvy:

$$a = \sqrt[3]{\frac{r_{\xi} \cdot P_{\xi}^2}{2 \cdot (m+1) \cdot m \cdot U^2 \cdot w_{\xi}}} = \sqrt[3]{\frac{1,35 \cdot 10^{-6} \cdot (21 \cdot 10^3)^2}{2 \cdot (10+1) \cdot 10 \cdot 400^2 \cdot 20000}} = 9,457 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

zaokrúhlime na normalizovanú hrúbku $a = a_n = 1 \text{ mm}$

- šírka pásu $b = m \cdot a = 10 \cdot 1 = 10 \text{ mm}$

- dĺžka pásu na 1 fázu (1 vetvu trojuholníka):

$$l = \sqrt[3]{\frac{P_{\xi} \cdot U^2 \cdot m}{4 \cdot (m+1)^2 \cdot r_{\xi} \cdot w_{\xi}^2}} = \sqrt[3]{\frac{21 \cdot 10^3 \cdot 400^2 \cdot 10}{4 \cdot (10+1)^2 \cdot 1,35 \cdot 10^{-6} \cdot 20000^2}} = 50,5 \text{ m}$$

Dĺžku pásu 1 vetvy zvolíme $l_{vetva} = 51$ m.

- *hmotnosť drôtu 1 vetvy:*

$$m_v = r_h \cdot l_{vetva} \cdot a \cdot b = 7250 \cdot 51 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 3,7 \text{ kg}$$

Tvar meandra

Pre rovnaké koeficienta zakrivenia meandra, t.j. $k_1 = 4$, $k_2 = 2$ dostaneme:

- *polomer zakrivenia meandra:*

$$R = k_1 \cdot a = 4 \cdot 1 = 4 \text{ mm}$$

- *strednú šírku meandra:*

$$B_{str} = k_2 \cdot b = 2 \cdot 10 = 20 \text{ mm}$$

- *dĺžku jednej vlny meandra:*

$$l_v = 2 \cdot (B_{str} - 2 \cdot R) + 2 \cdot p \cdot R = 2 \cdot B_{str} + 2,28 \cdot R = 2 \cdot 20 + 2,28 \cdot 4 = 49,12 \cong 49 \text{ mm}$$

- *počet vln meandra:*

$$n = \frac{l}{l_v} = \frac{51}{49 \cdot 10^{-3}} \cong 1041 \text{ vln}$$

- *stúpanie (krok) meandra:*

$$h = 4 \cdot R = 4 \cdot 4 = 16 \text{ mm}$$

- *celková (aktívna) dĺžka meandra jednej vetvy:*

$$L = n \cdot h = 1041 \cdot 16 \cdot 10^{-3} = 16,66 \text{ m}$$

Pre vytváranie tvaru meandra vypočítaných rozmerov je potrebné vytvoriť formu

- *s vnútornou šírkou:* $B_{vn} = B_{str} - a = 20 - 1 = 19 \text{ mm}$

- *s vonkajšou šírkou:* $B_{vo} = B_{str} + a = 20 + 1 = 21 \text{ mm}$

Uloženie meandrov do pracovnej komory pece

Na vnútorné steny pece výmurovky môžeme spolu umiestniť meander s celkovou aktívnou dĺžkou:

$$L_{real} = 2 \cdot \left(\frac{x}{B_{vo}} \cdot y + \frac{x}{B_{vo}} \cdot z + \frac{y}{B_{vo}} \cdot z \right) = 2 \cdot (17 + 17 + 17) = 102 \text{ m}$$

Dĺžka meandra, ktorý potrebujeme umiestniť dovnútra (uvažujeme už 3 fázy):

$$L_{vyp} = 3 \cdot L = 3 \cdot 16,66 = 50 \text{ m}$$

Z výsledku je vidieť, že úvodnú požiadavku uloženia výhrevných článkov na uvažované steny vnútornej výmurovky pece už vieme splniť a preto ako materiál výhrevných článkov zvolíme uvažovaný materiál od fy KANTHAL so spomínanými parametrami.