

### Výpočet elektrickej špirály

**Výhrevné články**, sú najdôležitejším prvkom odporových pecí s nepriamym ohrevom. Výber materiálu, správne dimenzovanie, umiestnenie a prevádzkovanie výhrevných článkov vplývajú na ich životnosť a zároveň na racionálnu prevádzku pece vrátane dodržiavania zvoleného tepelne-technologického režimu. Kvalita odporového materiálu sa posudzuje podľa tepelných vlastností, najmä dostatočnej žiaruvzdornosti pri pracovnej teplote, podľa mechanickej pevnosti, chemickej odolnosti proti pecnej atmosfére a najmä elektrických vlastností. Podľa ostatných kvalitných výhrevných článkov má mať:

- vysokú rezistivitu
- malý teplotný súčiniteľ odporu
- časovú stálosť odporu

V prevádzkach nízko a strednotepelných pecí sa osvedčili kovové výhrevné články na báze austenitických zliatin (Cr+Ni+Fe) a feritických zliatin (Cr+Al+Fe). Austenitické sú nemagnetické, povrchová vrstva  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  prispieva k žiaruvzdornosti materiálu a dobre odvádza teplo. Magnetické feritické zliatiny majú oxidovú vrstvu z  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , majú vyššiu rezistivitu, ale horšiu mechanickej pevnosť v porovnaní s austenitickými. Súčasný trh je zásobený dostatočným výberom týchto polotovarov s obchodnými názvami napr. CRONIX (aust.), CRONIFER (aust.), ALUCHROM (ferit) a najmä kvalitný KANTHAL (ferit) v rôznych modifikáciách. Ich maximálne pracovné teploty bývajú 1200 až 1350 °C.

Vysoko-teplotné pece sa osadzujú výhrevnými článkami na báze nekovov. Majú prirodzene vyššiu rezistivitu ako kovové, ale ťažšie sa spracovávajú. Preto sa distribuujú už ako hotové výrobky, najmä v tvare tyče alebo rúrky väčšieho prierezu. Materiálová báza týchto článkov je:

- karbid kremíka ( $\text{SiC}$ ), pre pracovné teploty 1300 až 1500 °C, (napr. SILIT, GLOBAR, CRUSILITE)
- zmes molybdenitu kremičitého ( $\text{MoSi}_2$ ) a oxidu kremičitého ( $\text{SiO}_2$ ). Známe články na tejto báze sú MOSOLIT a najmä KANTHAL Super pre pracovnú teplotu do 1700 °C.

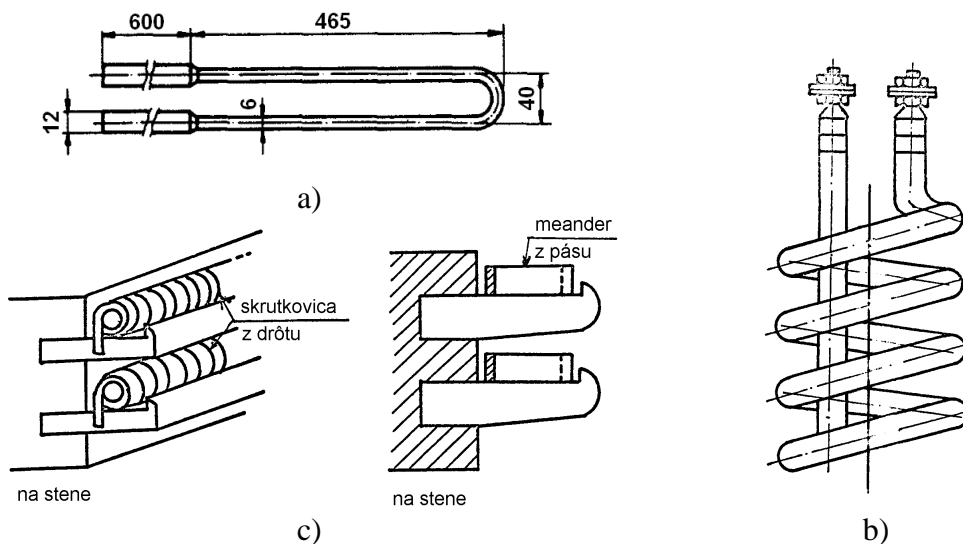
Pre najvyššie pracovné teploty odporových pecí sa používajú tiež čisté kovy, najmä molybdén (1400 až 2000 °C) a volfrám (až 2600 °C), vyžadujú však ochrannú atmosféru, resp. vákuum. Pre pracovné teploty 2500 až 3000 °C sa používajú grafitové články. Okrem menovitej pracovnej teploty výber výhrevného článku závisí od spôsobu prevádzkovania pece, od mechanickej požiadaviek a možného vplyvu pecnej atmosféry.

Výberu vhodného materiálu pre výhrevné články je potrebné venovať zodpovednú pozornosť, zvlášť pre kovové články. Aj pri správnom elektrickom výpočte životnosť článkov totiž rýchlo klesá najmä nerešpektovaním nežiaducich vzájomných vplyvov medzi povrchom článkov, keramikou, na ktorej sú uložené, prípadne aj atmosférou v pecnej komore. Obrátene to platí aj pre nosiče článkov. Keramický materiál nosičov má napr. obsahovať minimálne množstvo oxidov železa, síry,  $\text{SO}_2$ , ktoré rozrušujú najmä články zo zliatin CrNi. Naopak majú mať vysoký podiel  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a vysokú homogenitu, ktorá znižuje miestne prehriatia. Nosiče sa teda nemajú voliť len podľa stupňa žiaruvzdornosti. Podobne je treba hodnotiť aj vplyv riadenej atmosféry na materiál článkov.

### Konštrukcia a výpočet výhrevných článkov

Ako bolo skôr uvedené, nekovové výhrevné články sa vyrábajú ako hotové produkty, vo forme rôznych tvarov, s definovaným menovitým výkonom a rôznymi veľkosťami. Napr. silitové tyče (SiC) majú priemery od 1,2 do 5 cm, dĺžky od 12 do 200 cm. Ich životnosť je 3 až 10 tisíc pracovných hodín. Z bežných domácich spotrebičov sa nimi osadzujú známe infražiariče. Články na báze zmesi  $\text{MoSi}_2$  sú známe ako cermetové články (*ceramic, metal*), vyrábané práškovou metalurgiou. Z tohto typu článkov je vysokokvalitný KANTHAL Super, konštruovaný v tvare písmena U, so zosilnenými koncami. Napr. takýto článok s výkonom 2 kW má dĺžku aktívnej časti 40 cm pri priemere 0,6 cm. Na obr. 1 a) je naznačený uvedený typ článku.

Niektoré typy výhrevných článkov, resp. ich uloženie v pracovnej komore pece, sú naznačené na obr. 1.



Obr. 1 Výhrevné články: nekovový KANTHAL Super (a), kovový uzavretý článok – Backerova rúrka (b), uloženie článkov v tvare špirály a meandra (c)

Dimenzovanie nekovových článkov pre konkrétnu pec sa obmedzuje len na ich správne rozmiestnenie a na výpočet počtu kusov, t.j.

$$n = \frac{P_p}{P_{1\dot{\epsilon}}} \quad (1)$$

kde  $P_p$  je vypočítaný menovitý príkon pece  
 $P_{1\dot{\epsilon}}$  je menovitý výkon jedného článku

Kovové výhrevné články sa vyrábajú buď ako *uzavreté* alebo *otvorené*. Účelom uzatvorenia výhrevného vodiča je jeho ochrana od vplyvu pecnej atmosféry, ohrievaného média, prípadne ochrana pred mechanickým poškodením. V domácnostiach ich poznáme ako rúrkové články (Backerove rúrky), pre varné plochy varičov, ako články do žehličiek, do pračiek, ako ponorné špirály a pod. Na obr. 1 b) je znázornená bežná výhrevná špirála, ktorej funkciu povrchovej izolácie spĺňa  $\text{MgO}$ .

Otvorené kovové výhrevné články sa vyrábajú z polotovarov, t.j. drôtov alebo pásov, ktoré sa formujú do tvaru *špirál* alebo *meandrov* tak, aby na príslušnom úseku pracovnej komory

pece (steny, sekcie, zóny), dĺžkou zodpovedali požadovanému výkonu. Správne formovaný článok musí zároveň zodpovedať podmienkam optimálneho odvodu tepla z jeho povrchu, správneho upevnenia a minimálneho styku s keramikou. Správne navrhnutá špirála alebo meander musia minimalizovať vzájomné osalávanie, aby sa prídavne nezvyšovala teplota povrchu článku. Všeobecne pre konštrukciu špirál a meandrov platí, že so zvyšovaním pracovnej teploty ich stúpanie má byť väčšie (menšia hustota závitov, resp. vln na jednotku dĺžky). Na obr. 1 c) sú naznačené niektoré možnosti uloženia špirál a meandrov.

*Výpočet otvorených kovových výhrevných článkov spočíva v stanovení:*

- dĺžky drôtu, resp. pásu
- prierezu, resp. priemeru drôtu, resp. priečnych rozmerov pásu
- hmotnosti výhrevného článku
- rozmerových parametrov konečnej špirály, resp. meandra

*Vstupnými veličinami pre výpočet kovových článkov spravidla sú:*

- príkon pece, resp. príkon na jednu fázu v prípade trojfázových pecí, t.j.  $P_p$ , resp.  $P_p/3$ .
- napätie pece (230 V, resp. 400 V)
- merné povrchové zaťaženie (mpz) výhrevného článku

Pre optimálnu prevádzku pece a dostatočnú životnosť článku je dôležitá dovolená hodnota mpz. Mpz je formálne definované podielom výkonu výhrevného článku a plochou jeho povrchu:

$$w_{\xi} = \frac{P_{\xi}}{S_{\xi}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2)$$

čo fyzikálne vyjadruje hustotu tepelného toku vysálaného z povrchu článku. Pre reálny článok, t.j. so šedým povrchom, platí (pozri Stefan-Boltzmanov zákon):

$$w_{\xi, \text{id}} = q_{\xi} = c_{12} \cdot (T_{\xi}^4 - T_{\text{vs}}^4) \quad (3)$$

kde  $T_{\xi}$  je teplota povrchu článku [K]  
 $T_{\text{vs}}$  je teplota vsádzky [K]  
 $c_{12}$  je celkový koeficient sálania, závislý od stupňov čiernosti článku a vsádzky ( $\varepsilon$ )

$$c_{12} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8}}{\frac{1}{\varepsilon_{\xi}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{vs}}} - 1} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}] \quad (4)$$

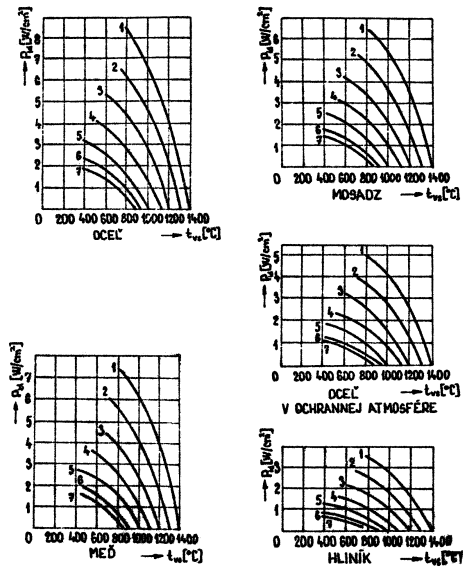
Rovnica (3) presne platí pre vzájomne sálanie dvoch šedých povrchov (článku a vsádzky) dostatočne veľkých a *vzájomne rovnobežných*. Preto takto definované mpz musíme považovať za ideálne, nezohľadňujúce skutočné podmienky výmeny tepla sálaním v pracovnej komore pece. Dovoľená hodnota mpz skutočného článku je

$$w_{\xi, \text{sk}} = k_{\text{ef}} \cdot w_{\xi, \text{id}} \quad (5)$$

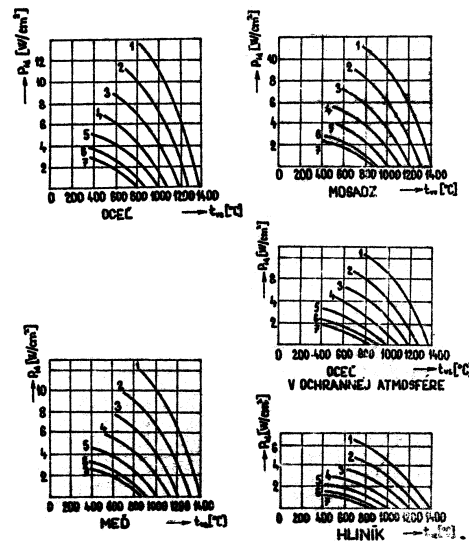
kde  $k_{\text{ef}}$  (označovaný aj  $\varphi$ ) je koeficient efektívnosti sálania, závislý od podmienok výmeny tepla sálaním medzi článkom, vsádzkou a výmurovkou pece. Pretože výrobca článkov spravidla udáva ideálnu hodnotu mpz ( $w_{\xi}$ ), koeficient  $k_{\text{ef}}$  je potrebné vypočítať. Pre výpočet existuje niekoľko spôsobov, rozdielnych metodikou, náročnosťou a presnosťou.

**Výpočet merného povrchového zaťaženia výhrevného článku**

Zo vzťahu (3) vyplýva, že pre zvolený materiál výhrevného článku ideálne merné povrchové zaťaženie závisí od teploty článku, od teploty vsádzky a absorpčných schopností vsádzky. Túto skutočnosť je možné vyjadriť pre konkrétny materiál a tvar článku ako funkciu oboch teplôt pre predpokladaný materiál vsádzky. Na nasledujúcich obrázkoch 2a a 2b sú znázornené takéto závislosti pre dvojaký tvar voľne uložených výhrevných článkov. Na obr. 2a pre výhrevné články v tvare tyčí, na obr. 2b pre články vinuté z drôtov alebo pásov.



Obr. 2a



Obr. 2b

V oboch prípadoch priebehy majú obmedzenú platnosť na zvolené materiály vsádzky, menovite na oceľ, oceľ v ochrannej atmosfére, meď, hliník a mosadz, pre teploty článkov:

- 1 ... 1400 °C
- 2 ... 1300 °C
- 3 ... 1200 °C
- 4 ... 1100 °C
- 5 ... 1000 °C
- 6 ... 900 °C
- 7 ... 850 °C

Pri voľbe druhu výhrevných článkov zohľadňujeme predovšetkým pokyny výrobcov pre správne použitie ich výrobkov. Rozhodujúca je obvykle menovitá teplota pece, chemické prostredie, v ktorom je článok inštalovaný, miesto pre jeho zabudovanie a cena článku.

1. Do teplôt 1100 °C je možné bezpečne použiť výhrevné články zo zliatin nikel-chróm, nikel-chróm-železo alebo chróm-hliník-železo.
2. Pre teploty do 1500 °C sú vhodné výhrevné články na báze karbidu kremíka, napr. Silít, Crusilit, Globar a pod.
3. Pre teploty do 1700 °C sa používajú výhrevné články na báze MoSi<sub>2</sub> a SiO<sub>2</sub> s lepšími elektrickými a mechanickými vlastnosťami ako predošlé (napr. KANTHAL Super).

4. V rozsahu teplôt 1800 – 2000 °C sa používajú molybdénové alebo volfrámové články, avšak s obmedzením na vákuum alebo redukčnú atmosféru.
5. Pre najvyššie teploty sa používajú grafitové články (do 2500 °C), resp. uhlíkové (do 3000 °C)

S využitím vyššie uvedených grafov pre stanovenie  $w_{\check{c},id}$  [W.m<sup>-2</sup>] je možné skutočné merné povrchové zaťaženie určiť *orientačne* pomocou vzťahu

$$w_{\check{c},sk} = k' \cdot w_{\check{c},id} \quad (6)$$

kde koeficient  $k'$  zohľadňuje len spôsob uloženia (vzájomného tienenia) výhrevných článkov:

- pre výhrevné články uložené v žľaboch je  $k' = 0,75$
- pre výhrevné články uložené v drážkach je  $k' = 0,45$

Pre bežné technické výpočty sa používa pre výpočet  $w_{\check{c},sk}$  presnejší vzťah (5), pričom konštanta  $k_{ef} = k$  je

$$k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \quad (7)$$

**Konštanta**  $k_1$  zohľadňuje účinnosť výmeny tepla medzi článkom a vsádzkou. Je definovaná pomerom efektívneho povrchu článku k skutočnému a závisí od tvaru a uloženia článku.

$$k_1 = \frac{S_{ef}}{S_{\check{c}}} < 1 \quad (8)$$

Hodnoty konštanty  $k_1$  určíme z tabuliek:

- a) pre články kruhového prierezu v tvare špirály, uložené v žliabkoch alebo na keramickej rúrke, kde

$h$  je stúpanie závitů

$d$  je priemer drôtu

$D$  je priemer špirály

Tabuľka 1

$\frac{h}{d}$	1,2	2	2,5	3	3,5	4
$k_1$	0,25	0,31	0,37	0,43	0,51	0,54

- Poznámky:**
1.  $\left(\frac{h}{d}\right)_{opt} = 3$
  2. pre  $d > 1$  mm je  $\left(\frac{D}{d}\right)_{opt} = 5$  až 7

- b) pre články kruhového prierezu v tvare meandra, zavesených voľne na hákoch, kde

$h$  je stúpanie meandra

$d$  je priemer drôtu

$T$  je šírka meandra

Tabuľka 2

$\frac{h}{d}$	5	6	7	8	9	10	11	12
$k_1$	0,67	0,71	0,75	0,79	0,82	0,84	0,85	1

- Poznámky:**
1.  $\left(\frac{h}{d}\right)_{\text{opt}} = 6 \text{ až } 9$
  2.  $T_{\text{max}} = 0,6 \text{ m}$  pre vertikálne uloženie  
 $T_{\text{max}} = 0,45 \text{ m}$  pre horizontálne uloženie

- c) pre články obdĺžnikového prierezu v tvare meandra, kde  
 $h$  je stúpanie meandra  
 $b$  je šírka pásu  
 $a$  je hrúbka pásu

Tabuľka 3

$\frac{h}{2b}$	0,8	1,6	2,4	3,6	4	4,8
$k_1$	0,37	0,56	0,7	0,77	0,8	0,82

- Poznámky:**
1.  $\left(\frac{h}{2b}\right)_{\text{opt}} = 1,5 \text{ až } 3$
  2.  $\frac{b}{a} = m > 1$

Uvedené hodnoty sa vzťahujú pre články uložené na bočných stenách pece. Ak sú uložené v drážkach na strope, konštanta  $k_1$  sa znižuje o 15 % pre obdĺžnikový tvar a o 30 % pre drôt v tvare špirály. Pre články uložené na dne pece sa hodnoty  $k_1$  znižujú o 30 až 50 %.

**Konštanta**  $k_2$  zohľadňuje rozmiestnenie článkov v peci a závisí od pomeru  $\frac{S_{vs}}{S_a}$ , kde  $S_a$  je „aktívna plocha“ stien pece, na ktorých sú umiestnené články;  $S_{vs}$  je tá časť povrchu vsádzky, ktorá je vystavená pôsobeniu článkov. (Ak sú články umiestnené len na bočných stenách pece,  $S_a$  je plocha bočných stien).

Tabuľka 4

$\frac{S_{vs}}{S_a}$	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
$k_2$	1	0,88	0,76	0,64	0,52	0,4

**Konštanta**  $k_3$  zohľadňuje vplyv skutočného vzájomného súčiniteľa sálenia  $(c_{12})_{\text{sk}}$ , t.j.

$$\frac{1}{k_3} = \frac{(c_{12})_{\text{sk}}}{(c_{12})_{\text{id}}} = \frac{\frac{1}{\varepsilon_{\check{c}}} + \frac{S_{vs}}{S_a} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{vs}} - 1\right)}{\frac{1}{\varepsilon_{\check{c}}} + \frac{1}{\varepsilon_{vs}} - 1} \quad (9)$$

### Rozdelenie príkonu pece na výhrevné články

Pri rozdelení celkového príkonu pece do jednotlivých častí (sekcí, zón) je potrebné rešpektovať zásady týkajúce sa požadovaného rozloženia teploty. Väčšina pecí (nad 10 kW) sa spravidla navrhuje ako trojfázové, preto celkový príkon sa rozdelí na diely, ktorých počet je deliteľný tromi. Podobne aj počet výhrevných článkov, ktoré sú z rovnakého materiálu a rovnakých rozmerov je deliteľný tromi. Zapájajú sa do skupín sériovo, na trojfázovú napájaciu sieť sa pripájajú paralelne do hviezdy alebo trojuholníka s možnosťou prepínania. Príkon do hviezdy je prirodzene jednotretinový z príkonu do trojuholníka.

### Výpočet rozmerov výhrevných článkov

Pri známej dovolenej hodnote  $mpz$  skutočného článku výpočet rozmerov, hmotnosti a parametrov tvaru špirály (z drôtu), resp. meandra (z pásu) je rutinný. Vychádza sa z dvoch rovníc pre výkon článku, z rovnice (2), t.j.

$$P_{\xi} = w_{\xi} \cdot S_{\xi} = w_{\xi} \cdot l \cdot o \quad [\text{W}] \quad (10)$$

a rovnice

$$P_{\xi} = \frac{U^2}{R_{\xi}} = \frac{U^2}{\rho_{\xi} \cdot \frac{l}{S}} \quad [\text{W}] \quad (11)$$

Ich porovnaním pre dĺžku predmetného vodiča priamo dostaneme súčin prierezu a obvodu, ako funkciu známych elektrických parametrov

$$S \cdot o = \frac{\rho_{\xi} \cdot P_{\xi}^2}{w_{\xi} \cdot U^2} \quad [\text{m}^3] \quad (12)$$

kde  $\rho_{\xi}$  je rezistivita výhrevného článku [ $\Omega \cdot \text{m}$ ]  
 $o$  obvod výhrevného článku;  $o = 2 \cdot \pi \cdot r$  [m]  
 $S$  prierez výhrevného článku;  $S = \pi \cdot r^2$  [ $\text{m}^2$ ]

Zo vzťahu (10) vyplýva pre dĺžku článku, resp. skupinu článkov

$$l = \frac{U^2 \cdot S}{\rho_{\xi} \cdot w_{\xi}} = \frac{P_{\xi}}{w_{\xi} \cdot o} \quad [\text{m}^3] \quad (13)$$

Rovnica (12) umožňuje vypočítať:

a1) priemer drôtu pre článok v tvare **špirály**:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \rho_{\xi} \cdot P_{\xi}^2}{\pi^2 \cdot w_{\xi} \cdot U^2}} \quad [\text{m}] \quad (14)$$

a2) dĺžku drôtu pre článok v tvare **špirály**:

$$l = \sqrt[3]{\frac{P_{\xi} \cdot U^2}{4 \cdot \pi \cdot \rho_{\xi} \cdot w_{\xi}^2}} \quad [\text{m}] \quad (15)$$

a3) hmotnosť drôtu pri známej mernej hmotnosti zvoleného materiálu článku

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot l \quad [\text{kg}] \quad (16)$$

Vypočítaný priemer drôtu sa zaokrúhľuje vždy k najbližšej vyššej hodnote podľa radu normalizovaných priemerov drôtov výrobcu (v mm).

b1) rozmery pásu pre článok v tvare **meandra**.

Prierez pásu má rozmery  $a \times b$  s pomerom  $\frac{b}{a} = m > 1$ . Obvod tohto pásu má obvod  $o = 2 \cdot (a + b) = 2 \cdot (a + a \cdot m) = 2 \cdot a \cdot (1 + m)$  a prierez pásu  $S = a \cdot b = a \cdot a \cdot m = a^2 \cdot m$ . Dosadením týchto vzťahov do výrazov (12) a (13) dostaneme

- hrúbka pásu

$$a = \sqrt[3]{\frac{\rho_{\xi} \cdot P_{\xi}^2}{2 \cdot (m+1) \cdot m \cdot w_{\xi} \cdot U^2}} \quad [\text{m}] \quad (17)$$

- šírka pásu

$$b = m \cdot a \quad [\text{m}] \quad (18)$$

b2) dĺžka pásu pre článok v tvare **meandra**

$$l = \sqrt[3]{\frac{m \cdot P_{\xi} \cdot U^2}{4 \cdot (m+1)^2 \cdot \rho_{\xi} \cdot w_{\xi}^2}} \quad [\text{m}] \quad (19)$$

b3) hmotnosť pásu – rovnako ako hmotnosť drôtu

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot a \cdot b \cdot l \quad [\text{kg}] \quad (20)$$

Pomer šírky k hrúbke pásu sa volí podľa normalizovaných rozmerov pásov výrobcu (najčastejšie:  $m = 5; 8; 10; 12$ ).

S ohľadom na zaokrúhľovanie priemeru drôtu, resp. šírky pásu do normalizovaných rozmerov je potrebné spätne kontrolovať merné povrchové zaťaženie výhrevného článku. Má zodpovedať podmienke:

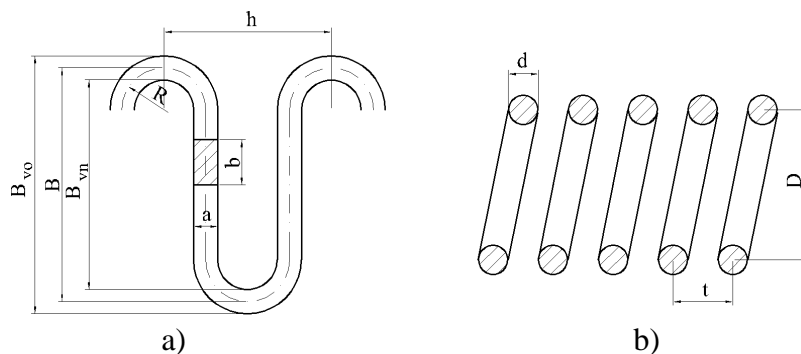
$$w_{\xi} = \frac{P_{\xi}}{l \cdot o} < w_{\text{skutočné}} \quad (21)$$

Pri rozmiestňovaní výhrevných článkov je súčasne potrebné uvážiť výkon článkov na plošnú jednotku steny pece, na ktorej sú umiestnené.

Vypočítaný priemer drôtu, resp. hrúbku a šírku pásu, je potrebné korigovať na normalizované hodnoty. Tieto, ako aj niektoré ďalšie praktické poznámky k výpočtu článkov a ich rozdeľovaniu do skupín z pohľadu príkonu pece, sú uvedené v literatúre výrobcu.

Z rovníc (14) a (17) vyplýva jedna dôležitá skutočnosť: so znižovaním napätia na článku, zväčšuje sa aktívny prierez a znižuje dĺžka článku. Nižšie pracovné napätia sú preto výhodnejšie, lebo zvyšujú životnosť článkov (väčší prierez) a uľahčujú ich inštaláciu v pracovnej komore pece (menšia dĺžka špirály, resp. meandra).

Známe hodnoty z rovníc (14) až (20) postačujú pre výpočet ostatných geometrických parametrov konečného tvaru špirály a meandra (obr. 3).



Obr. 3 a) výhrevný meander b) výhrevná špirála



Pre tvarovanie drôtu, resp. pásu do konečnej formy výrobca polotovaru spravidla udáva:

a) pre **špirálu** (obr. 3 b))

- činiteľ stúpania  $t_1 = \frac{t}{d}$  (22)

- činiteľ točenia  $r_1 = \frac{D}{d}$  (23)

Tieto určujú tvarové parametre špirály:

- stúpanie špirály  $t = t_1 \cdot d$
- stredný priemer špirály  $D = r_1 \cdot d$
- vonkajší priemer  $D_{vo} = D + d$
- vnútorný priemer  $D_{vn} = D - d$
- dĺžku jedného závitov  $l_z = \pi \cdot D$
- počet závitov špirály  $n_z = \frac{l}{l_z}$
- celková dĺžka špirály  $L_s = n_z \cdot t$

Firma KANTHAL odporúča hodnoty činiteľov stúpania  $(t_1)_{opt} = 3$ ; točenia  $(r_1)_{opt} = 5$ .

b) pre **meander** (obr. 3 a))

- činiteľ zakrivenia  $k_1 = \frac{R}{a}$  (24)

- činiteľ zvlnenia  $k_2 = \frac{B}{b}$  (25)

Tvarové parametre meandra sú:

- polomer zakrivenia  $R = k_1 \cdot a$
- stredná šírka meandra  $B = k_2 \cdot b$
- vonkajšia šírka  $B_{vo} = B + a$
- vnútorná šírka  $B_{vn} = B - a$
- dĺžka jednej vlny  $l_v = 2 \cdot (B - 2 \cdot R) + 2 \cdot \pi \cdot R$
- počet vln meandra  $n_m = \frac{l}{l_v}$
- krok meandra  $h = 4 \cdot R$
- celková dĺžka meandra  $L_m = n_m \cdot h$

Firma KANTHAL odporúča hodnoty činiteľov zakrivenia  $(k_1)_{opt} = 4$  až  $5$ ; zvlnenia  $(k_2)_{opt} = 2 \div 3$ .

**Príklad 1**

Navrhňte výhrevné články kruhového prierezu v meandrovom uložení pre šachtovú odporovú pec valcového tvaru s vnútorným polomerom 800 mm, dĺžky 2,5 m. Pracovná teplota pece je 800 °C (*poznámka*: uvažujte teplotu vsádzky totožnú s teplotou pece), príkon pece, stanovený tepelným výpočtom, je 75 kW. Vsádzkou je oceľový valec s polomerom 400 mm, dĺžky 2 m. Voľte výhrevné články typu CRONIX s pracovnou teplotou 900 °C, umiestnené na bočných stenách pece. Koeficienty pomernej sálavosti článkov a vsádzky sú  $\varepsilon_{vs} = \varepsilon_{\check{c}} = 0,8$ .

**Poznámka:** normalizované priemery drôtu firmy KANTHAL [mm]: 2; 2,2; 2,5; 2,8; 3,2; 3,6; 4; 4,5; 5; 5,6; 6,3; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20.

*Riešenie:*

1. Ideálne merné povrchové zaťaženie výhrevného článku

a) ideálne merné povrchové zaťaženie absolútne čierneho článku a vsádzky ( $\varepsilon_{\check{c}} = \varepsilon_{vs} = 1$ )

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

b) ideálne merné povrchové zaťaženie reálneho článku a vsádzky ( $\varepsilon_{\check{c}} = 0,8$ ,  $\varepsilon_{vs} = 0,8$ )

$$w_{\check{c},id} = q_{\check{c}} = c_{12} \cdot (T_{\check{c}}^4 - T_{vs}^4) = \frac{5,67 \cdot 10^{-8}}{\frac{1}{\varepsilon_{\check{c}}} + \frac{1}{\varepsilon_{vs}} - 1} \cdot (T_{\check{c}}^4 - T_{vs}^4)$$

$$w_{\check{c},id} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8}}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,8} - 1} \cdot [(900 + 273)^4 - (800 + 273)^4] = 21456 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

2. Skutočné merné povrchové zaťaženie článku

a) orientačne:

$$w_{\check{c},sk} = k' \cdot w_{\check{c},id}$$

kde koeficient  $k'$  zohľadňuje len spôsob uloženia (vzájomného tienenia) výhrevných článkov:

- pre výhrevné články uložené v žľaboch je  $k' = 0,75$
- pre výhrevné články uložené v drážkach je  $k' = 0,45$

Pretože v navrhovanej peci predpokladáme ohrev z povrchu všetkých stien symetricky, zvolíme pre bočné steny  $k' = 0,75$ . Potom

$$w_{\check{c}} = 0,75 \cdot w_{\check{c},id} = 16092 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

b) presnejšie

$$k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$$

$$w_{\check{c},sk} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot w_{\check{c},id}$$

kde  $k_1$  je koeficient závislý od tvaru špirály alebo meandra. Ak sa rozhodneme pre špirálu v tvare meandra pre optimálny pomer jeho stúpania (kroku) k šírke pásu  $(h/d)_{opt} = 6 \div 9$ , volíme 7 a koeficient  $k_1 = 0,75$  (viď Tabuľka 2)

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

$$\frac{S_{vs}}{S_{akt}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{vs} \cdot l_{vs}}{2 \cdot \pi \cdot r_{pec} \cdot l_{pec}} = \frac{\pi \cdot d_{vs} \cdot l_{vs}}{\pi \cdot d_{pec} \cdot l_{pec}} = \frac{\pi \cdot 0,4 \cdot 2}{\pi \cdot 0,8 \cdot 2,5} = 0,4$$

čomu zodpovedá  $k_2 = 0,52$  (viď Tabuľka 4)

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

$$\frac{1}{k_3} = \frac{(c_{12})_{sk}}{(c_{12})_{id}} = \frac{\frac{1}{\varepsilon_{\xi}} + \frac{S_{vs}}{S_a} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{vs}} - 1\right)}{\frac{1}{\varepsilon_{\xi}} + \frac{1}{\varepsilon_{vs}} - 1} = \frac{\frac{1}{0,8} + \frac{\pi \cdot 0,4 \cdot 2}{\pi \cdot 0,8 \cdot 2,5} \cdot \left(\frac{1}{0,8} - 1\right)}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,8} - 1} = 0,9 \quad \Rightarrow \quad k_3 = 1,11$$

Potom

$$w_{\xi,sk} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot w_{\xi,id} = 0,75 \cdot 0,52 \cdot 1,11 \cdot 21456 = 9298 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Za skutočné merné povrchové zaťaženie zvolíme hodnotu  $9298 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

3. Rozdelenie príkonu pece na články. Pre príkon 75 kW volíme trojfázovú pec so zapojením výhrevných článkov do trojuholníka.

$$P_{\xi,1} = \frac{P_p}{3} = \frac{75000}{3} = 25000 \text{ W} = 25 \text{ kW}$$

4. Výpočet rozmerov a hmotnosti výhrevného článku na jednu vetvu

Počítame skupinu článkov pre príkon  $P_{\xi} = 25 \text{ kW}$  (1 fáza), napätie  $U = 400 \text{ V}$  a  $w_{\xi,sk} = 9298 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Predmetná vsádzka patrí do triedy stredno-teplotných, ktorej vyhovujú kovové výhrevné články. Materiál CRONIX, vyhovujúci do pracovných teplôt  $1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$  má nasledovné parametre:

- stupeň čiernosti:  $\varepsilon_{\xi} = 0,8$
- rezistencia pri  $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :  $\rho_{\xi} = 1,15 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$
- merná hmotnosť:  $\rho_h = 8400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

- priemer drôtu

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \rho_{\xi} \cdot P_{\xi}^2}{\pi^2 \cdot w_{\xi} \cdot U^2}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,15 \cdot 10^{-6} \cdot (25000)^2}{\pi^2 \cdot 9298 \cdot 400^2}} = 5,807 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Vypočítaný priemer drôtu zaokrúhlime na normalizovaný:

$$d = 6,3 \text{ mm}$$

- dĺžka drôtu

$$l = \sqrt[3]{\frac{P_{\xi} \cdot U^2}{4 \cdot \pi \cdot \rho_{\xi} \cdot w_{\xi}^2}} = \sqrt[3]{\frac{25000 \cdot 400^2}{4 \cdot \pi \cdot 1,15 \cdot 10^{-6} \cdot 92988^2}} = 147,4 \text{ m}$$

- hmotnosť drôtu

$$m = \rho_h \cdot V = \rho_h \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot l = 8400 \cdot \pi \cdot \left(\frac{6,3 \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2 \cdot 147,4 \cong 38,6 \text{ kg}$$

- stúpanie meandra pre pomer  $\frac{h}{d} = 7$

$$h = 7 \cdot d = 7 \cdot 6,3 \cdot 10^{-3} = 44,1 \text{ mm}$$

### 5. Kontrola merného povrchového zaťaženia

$$w'_{\xi,sk} < w_{\xi,sk}$$

$$w'_{\xi,sk} = \frac{P_{\xi,1}}{l \cdot o} = \frac{P_{\xi,1}}{l \cdot \pi \cdot d} = \frac{25000}{147,4 \cdot \pi \cdot 6,3 \cdot 10^{-3}} = 8570 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$w'_{\xi,sk} = 8563,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} < w_{\xi,sk} = 9298 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

t.j. vyhovuje.

6. Výpočet geometrických parametrov výhrevného článku pre tvarovanie drôtu do konečnej formy v tvare meandra (viď obrázok b) pri bode 7 (nižšie):

- činiteľ stúpania  $c_1 = \frac{h}{d}$

Firma KANTHAL odporúča optimálne hodnoty činiteľov stúpania meandra  $c_1 = f(k_1)_{opt} = 6 \div 9$ ; a maximálnu šírku meandra  $T_{max} = 0,6 \text{ m}$  (pre vertikálne uloženie) a  $T_{max} = 0,45 \text{ m}$  (pre horizontálne uloženie), preto zvolíme hodnoty v rámci odporúčaných hodnôt a to:  $c_1 = 7$  a  $T_{max} = 0,2 \text{ m}$ .

Tieto určujú tvarové parametre meandra:

- stúpanie meandra  $h = c_1 \cdot d = 7 \cdot 6,3 = 44,1 \text{ mm}$

- polomer zakrivenia meandra  $R = \frac{h}{4} = \frac{44,1}{4} = 11,025 \text{ mm}$

- stredná šírka meandra  $T = T_{max} - d = 200 - 6,3 = 193,7 \text{ mm}$

- vonkajšia šírka meandra  $T_{vo} = T_{max} = 200 \text{ mm}$

- vnútorná šírka meandra  $T_{vn} = T - d = 193,7 - 6,3 = 187,4 \text{ mm}$

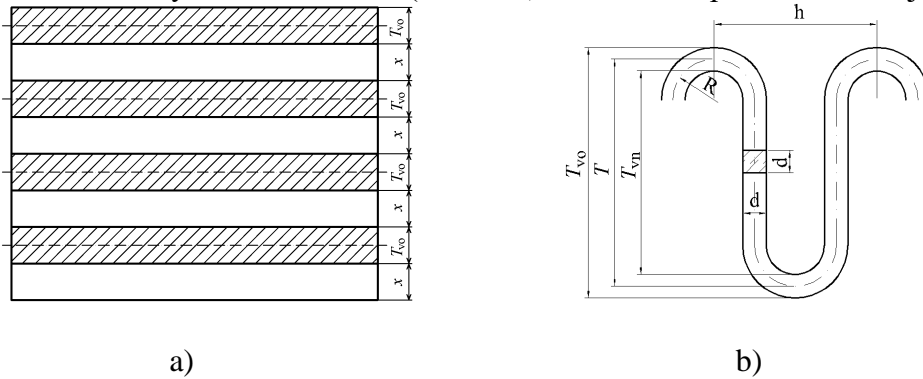
- dĺžku jednej periódy

$$l_p = 2 \cdot (T - 2 \cdot R) + 2 \cdot \pi \cdot R = 2 \cdot (193,7 - 2 \cdot 11,025) + 2 \cdot \pi \cdot 11,025 = 412,57 \text{ mm}$$

- počet periód meandra  $n_p = \frac{l}{l_p} = \frac{147,4}{412,57 \cdot 10^{-3}} = 357,25$

- celková dĺžka meandra  $L_m = n_p \cdot h = 357 \cdot 44,1 \cdot 10^{-3} = 15,755 \text{ m}$

7. Kontrola umiestnenia výhrevného článku (meandra) na 1 fázu na ploche uvedenej v zadaní:



kde:  $T_{vo}$  vonkajšia šírka meandra  
 $x$  medzera medzi časťami meandra (kvôli vzájomnému osalávaniu jednotlivých častí výhrevného článku). Väčšinou sa volí  $x = 5 \cdot d$ .

Vnútorňý povrch stien pece  $S_{a,1}$  (aktívna plocha), na ktorom majú byť uložené články (na 1 fázu):

$$S_{a,1} = (x + T_{vo}) \cdot L_m = (5 \cdot d + T_{vo}) \cdot L_m = (5 \cdot 0,0063 + 0,2) \cdot 15,755 = 3,6472 \text{ m}^2$$

Vnútorňý povrch stien pece  $S_a$  (aktívna plocha), na ktorom majú byť uložené články (na všetky 3 fázy):

$$S_a = 3 \cdot S_{a,1} = 3 \cdot 3,647 = 10,942 \text{ m}^2$$

Požadovaná plocha pre umiestnenie výhrevných článkov je: vnútorňý valcový plášť pece, t.j.:

$$S_{a,dov} = 2 \cdot \pi \cdot r_{pec} \cdot l_{pec} = 2 \cdot \pi \cdot 0,8 \cdot 2,5 = 12,57 \text{ m}^2$$

Kontrola umiestnenia výhrevných článkov na požadovanej ploche danej v zadaní:

$$S_a < S_{a,dov}$$

$10,94 \text{ m}^2 < 12,57 \text{ m}^2$  čo platí, preto nemusíme uviesť alternatívy riešenia a môžeme uvažovať s umiestnením a geometrickými rozmermi uvedenými vyššie.

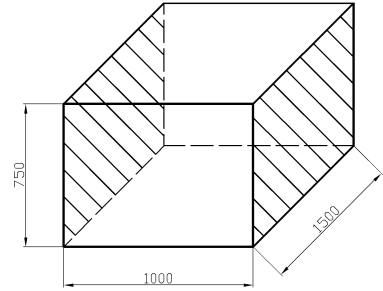
Ak by daná nerovnosť neplatila, zvolili by sme nasledovné alternatívy ďalšieho riešenia:

- Zväčšíme rozmery pracovnej komory (ak je to možné), alebo
- Umiestnime výhrevné články na zvyšných stenách pece (napr. na prednej a zadnej stene valcovej komory pece), alebo
- Použijeme výhrevný odporový drôt s väčším merným povrchovým zaťažením (napr. KANTHAL Super), alebo
- Zvolíme menšie medzery medzi jednotlivými sekciami špirály (nevýhoda, pretože znížime tak životnosť výhrevných článkov,  $x < 5 \cdot d$ ), alebo
- Pri výpočte geometrických parametrov výhrevného článku pre tvarovanie drôtu do konečnej formy zvolíme menšie zakrivenie meandra  $h < c_1 \cdot d$  (na úkor životnosti výhrevných článkov).
- atď.

Po každej zvolenej alternatíve riešenia musíme vykonať kontrolu umiestnenia výhrevných článkov  $S_a < S_{a,dov}$  (prípadne vykonať ďalšiu iteráciu výpočtu), či nami navrhnuté výhrevné články vyhovujú pracovnej teplote a geometrickým rozmerom pece.

**Príklad 2**

Navrhnete výhrevné články pre trojfázovú žihaciu pec s výkonom 100 kW, s pracovnou teplotou pece 880 °C. Použite články typu CRONIFER s parametrami: články určené pre teplotu 1000 °C,  $\rho_{el} = 1,24 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$ ,  $\rho_m = 8400 \text{ kg} \cdot m^{-3}$ ,  $\varepsilon_{el} = 0,8$ . Výhrevné články nech sú kruhového prierezu v tvare špirál, umiestnené na bočných stenách v žliabkoch. Pomer  $\frac{S_{vs}}{S_a} \cong 0,8$ ;  $\frac{h}{d} = 3$ . Žihací materiál je oceľ;  $\varepsilon_{vs} = 0,8$ . Zapojenie článkov je do trojuholníka a napätie zdroja je  $U = 400 \text{ V}$ . Výhrevné články umiestnite na 2 bočných stenách komory pece (vid' obrázok).



*Riešenie:*

1. Ideálne merné povrchové zaťaženie reálneho článku a vsádzky ( $\varepsilon_{\xi} = 0,8$ ,  $\varepsilon_{vs} = 0,8$ )

$$w_{\xi, id} = q_{\xi} = c_{12} \cdot (T_{\xi}^4 - T_{vs}^4) = \frac{5,67 \cdot 10^{-8}}{\frac{1}{\varepsilon_{\xi}} + \frac{1}{\varepsilon_{vs}} - 1} \cdot (T_{\xi}^4 - T_{vs}^4)$$

$$w_{\xi, id} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8}}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,8} - 1} \cdot [(1000 + 273)^4 - (880 + 273)^4] = 324621 \text{ W} \cdot m^{-2}$$

2. Skutočné merné povrchové zaťaženie článku

a) orientačne:

$$w_{\xi, sk} = k' \cdot w_{\xi, id}$$

kde koeficient  $k'$  zohľadňuje len spôsob uloženia (vzájomného tienenia) výhrevných článkov:

- pre výhrevné články uložené v žľaboch je  $k' = 0,75$
- pre výhrevné články uložené v drážkach je  $k' = 0,45$

Pretože v navrhovanej peci predpokladáme ohrev z povrchu stien symetricky, zvolíme pre bočné steny  $k' = 0,75$ . Potom

$$w_{\xi} = 0,75 \cdot w_{\xi, id} = 24346,6 \text{ W} \cdot m^{-2}$$

b) presnejšie

$$k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$$

$$w_{\xi, sk} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot w_{\xi, id}$$

kde  $k_1$  je koeficient závislý od tvaru špirály alebo meandra. Ak sa rozhodneme pre výhrevný odporový drôt kruhového prierezu v tvare špirály, uložený v žliabkoch, pre optimálny pomer jeho stúpania závit (kroku) k priemeru drôtu  $(h/d)_{opt} = 3$ . Volíme teda 3 a koeficient  $k_1 = 0,43$  (vid' Tabuľka 1)

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

$$\frac{S_{vs}}{S_{akt}} = 0,8 \text{ (zo zadania)}$$

čomu zodpovedá  $k_2 = 1$  (vid' Tabuľka 4)

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

$$\frac{1}{k_3} = \frac{(c_{12})_{sk}}{(c_{12})_{id}} = \frac{\frac{1}{\varepsilon_{\xi}} + \frac{S_{vs}}{S_a} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{vs}} - 1\right)}{\frac{1}{\varepsilon_{\xi}} + \frac{1}{\varepsilon_{vs}} - 1} = \frac{\frac{1}{0,8} + 0,8 \cdot \left(\frac{1}{0,8} - 1\right)}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,8} - 1} = 0,9667 \Rightarrow k_3 = 1,0345$$

Potom

$$w_{\xi,sk} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot w_{\xi,id} = 0,43 \cdot 1 \cdot 1,0345 \cdot 324621 \cong 14440 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Za skutočné merné povrchové zaťaženie zvolíme hodnotu  $14440 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

3. Rozdelenie príkonu pece na články. Pre príkon  $100 \text{ kW}$  volíme trojfázovú pec so zapojením výhrevných článkov do trojuholníka (zo zadania).

$$P_{\xi,1} = \frac{P_p}{3} = \frac{100000}{3} = 33333,3 \text{ W} = 33,333 \text{ kW}$$

4. Výpočet rozmerov a hmotnosti výhrevného článku na jednu vetvu

Počítame skupinu článkov pre príkon  $P_{\xi} = 33,333 \text{ kW}$  (1 fáza), napätie  $U = 400 \text{ V}$  a  $w_{\xi,sk} = 14440 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Predmetná vsádzka patrí do triedy stredno-teplotných, ktorej vyhovujú kovové výhrevné články. Materiál CRONIFER, vyhovujúci do pracovných teplôt  $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$  má nasledovné parametre:

- stupeň čiernosti:  $\varepsilon_{\xi} = 0,8$
- rezistencia pri  $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :  $\rho_{\xi} = 1,24 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$
- merná hmotnosť:  $\rho_h = 8400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

- priemer drôtu

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \rho_{\xi} \cdot P_{\xi}^2}{\pi^2 \cdot w_{\xi} \cdot U^2}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,24 \cdot 10^{-6} \cdot (33333,3)^2}{\pi^2 \cdot 14440 \cdot 400^2}} = 6,229 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Vypočítaný priemer drôtu zaokrúhlime na normalizovaný:  $d = 6,3 \text{ mm}$

- dĺžka drôtu

$$l = \sqrt[3]{\frac{P_{\xi} \cdot U^2}{4 \cdot \pi \cdot \rho_{\xi} \cdot w_{\xi}^2}} = \sqrt[3]{\frac{33333,3 \cdot 400^2}{4 \cdot \pi \cdot 1,24 \cdot 10^{-6} \cdot 14440^2}} = 117,96 \text{ m}$$

- hmotnosť drôtu

$$m = \rho_h \cdot V = \rho_h \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot l = 8400 \cdot \pi \cdot \left(\frac{6,3 \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2 \cdot 117,96 \cong 30,89 \text{ kg}$$

### 5. Kontrola merného povrchového zaťaženia

$$w'_{\xi,sk} < w_{\xi,sk}$$

$$w'_{\xi,sk} = \frac{P_{\xi,1}}{l \cdot o} = \frac{P_{\xi,1}}{l \cdot \pi \cdot d} = \frac{33333,3}{117,96 \cdot \pi \cdot 6,3 \cdot 10^{-3}} = 14277,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$w'_{\xi,sk} = 14277,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} < w_{\xi,sk} = 14440 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

t.j. vyhovuje.

### 6. Výpočet geometrických parametrov výhrevného článku pre tvarovanie drôtu do konečnej formy (pozri obr. 3 b)):

- činiteľ stúpania  $t_1 = \frac{t}{d}$

- činiteľ točenia  $r_1 = \frac{D}{d}$

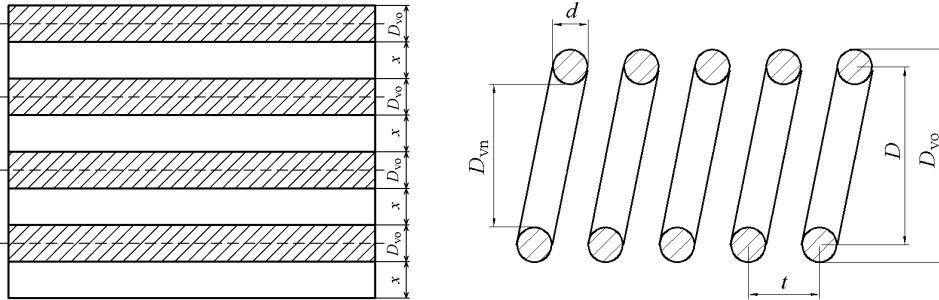
Firma KANTHAL odporúča optimálne hodnoty činiteľov stúpania  $(t_1)_{opt} = 3$ ; točenia  $(r_1)_{opt} = 5$ , preto zvolíme aj my tieto odporúčané hodnoty.

Tieto určujú tvarové parametre špirály:

- stúpanie špirály  $t = t_1 \cdot d = 3 \cdot 6,3 \cdot 10^{-3} = 18,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
- stredný priemer špirály  $D = r_1 \cdot d = 5 \cdot 6,3 \cdot 10^{-3} = 31,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
- vonkajší priemer  $D_{vo} = D + d = 31,5 \cdot 10^{-3} + 6,3 \cdot 10^{-3} = 37,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
- vnútorný priemer  $D_{vn} = D - d = 31,5 \cdot 10^{-3} - 6,3 \cdot 10^{-3} = 25,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
- dĺžku jedného závitú  $l_z = \pi \cdot D = \pi \cdot 25,2 \cdot 10^{-3} = 98,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
- počet závitov špirály  $n_z = \frac{l}{l_z} = \frac{117,96}{98,96 \cdot 10^{-3}} = 1192$
- celková dĺžka špirály  $L_s = n_z \cdot t = 1192 \cdot 18,9 \cdot 10^{-3} = 22,529 \text{ m}$

### 7. Kontrola umiestnenia výhrevného článku (špirály) na 1 fázu na ploche uvedenej v zadaní:





kde:  $D_{vo}$  vonkajší priemer špirály  
 $x$  medzera medzi časťami špirály (kvôli vzájomnému osalávaniu jednotlivých častí výhrevného článku). Väčšinou sa volí  $x = D_{vo}$ .

Vnútorňý povrch stien pece  $S_{a,1}$  (aktívna plocha), na ktorom majú byť uložené články (na 1 fázu):

$$S_{a,1} = (x + D_{vo}) \cdot L_s = (D_{vo} + D_{vo}) \cdot L_s = 2 \cdot D_{vo} \cdot L_s = 2 \cdot 37,8 \cdot 10^{-3} \cdot 22,529 = 1,703 \text{ m}^2$$

Vnútorňý povrch stien pece  $S_a$  (aktívna plocha), na ktorom majú byť uložené články (na všetky 3 fázy):

$$S_a = 3 \cdot S_{a,1} = 3 \cdot 1,703 = 5,11 \text{ m}^2$$

Požadovaná plocha pre umiestnenie výhrevných článkov je: 2 bočné steny, t.j.:

$$S_{a,dov} = 2 \cdot (0,75 \cdot 1,5) = 2,25 \text{ m}^2$$

Kontrola umiestnenia výhrevných článkov na požadovanej ploche danej v zadaní:

$$S_a < S_{a,dov}$$

$5,11 \text{ m}^2 < 2,25 \text{ m}^2$  čo neplatí, preto musíme uviesť alternatívy riešenia:

- Zväčšíme rozmery pracovnej komory (ak je to možné), alebo
- Umiestnime výhrevné články na zvyšných stenách (napr. na strope a dne komory pece), alebo
- Použijeme výhrevný odporový drôt väčším merným povrchovým zaťažením (napr. KANTHAL Super), alebo
- Zvolíme menšie medzery medzi jednotlivými sekciami špirály (nevýhoda, pretože znížime tak životnosť výhrevných článkov,  $x < D_{vo}$ ), alebo
- Pri výpočte geometrických parametrov výhrevného článku pre tvarovanie drôtu do konečnej formy zvolíme menšie stúpanie špirály  $t < 3 \cdot d$  (na úkor životnosti výhrevných článkov), alebo
- atď.

Po každej zvolenej alternatíve riešenia musíme vykonať kontrolu umiestnenia výhrevných článkov  $S_a < S_{a,dov}$  (prípadne vykonať ďalšiu iteráciu výpočtu), či nami navrhnuté výhrevné články vyhovujú pracovnej teplote a geometrickým rozmerom pece.

*Výpočet podľa alternatívy b)*

Umiestnenie výhrevných článkov na zvyšných stenách (napr. na strope a dne komory pece).

$$S_{a,dov} = 2 \cdot (0,75 + 1) \cdot 1,5 = 5,25 \text{ m}^2$$

Kontrola umiestnenia výhrevných článkov na požadovanej ploche danej v zadaní:

$$S_a < S_{a,dov}$$

$$5,11 \text{ m}^2 < 5,25 \text{ m}^2 \quad \text{nerovnosť platí}$$

Ak chceme použiť výhrevný odporový drôt požadovaný v zadaní, musíme použiť pre umiestnenie výhrevného článku v tvare špirály aj zvyšné dve steny (na strope a dne komory pece).

### Príklad 3

Navrhňte a vypočítajte výhrevné články pre komorovú odporovú pec s výkonom 63 kW pre periodický režim ohrevu a ochladzovania vsádzky. Vsádzkou je legovaná oceľ s  $\varepsilon_{vs} = 0,82$  v tvare kocky s rozmermi  $a \times a \times a = 0,4 \times 0,4 \times 0,4 \text{ m}$ . V peci sa bude vsádzka ohrievať na konečnú teplotu  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  a potom ochladzovať. Pec má tvar kocky s dĺžkou strany  $0,6 \text{ m}$ . Výhrevné články je možné umiestniť na všetkých vnútorných stenách komory pece. Predmetná vsádzka patrí do triedy stredneteplotných, ktorej vyhovujú kovové výhrevné články. Zvoľte **pásový** materiál CRONIX, vyhovujúci do pracovných teplôt  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  s parametrami  $\varepsilon_\xi = 0,85$ ,  $\rho_\xi = 1,15 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ ,  $\rho_h = 8400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Zapojenie článkov je do trojuholníka a napätie zdroja je  $U = 400 \text{ V}$ .

Riešenie:

1. Ideálne merné povrchové zaťaženie reálneho článku a vsádzky ( $\varepsilon_\xi = 0,85$ ,  $\varepsilon_{vs} = 0,82$ )

$$w_{\xi,id} = q_\xi = c_{12} \cdot (T_\xi^4 - T_{vs}^4) = \frac{5,67 \cdot 10^{-8}}{\frac{1}{\varepsilon_\xi} + \frac{1}{\varepsilon_{vs}} - 1} \cdot (T_\xi^4 - T_{vs}^4)$$

$$w_{\xi,id} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8}}{\frac{1}{0,85} + \frac{1}{0,82} - 1} \cdot [(900 + 273)^4 - (800 + 273)^4] = 23055 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

2. Skutočné merné povrchové zaťaženie článku

$$k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$$

$$w_{\xi,sk} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot w_{\xi,id}$$

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  $(h/2b)_{opt} = 1,5 \div 3$ , volíme  $1,6$  a koeficient  $k_1 = 0,56$  (viď Tabuľka 3)

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

$$\frac{S_{vs}}{S_a} = \frac{6 \cdot (0,4 \cdot 0,4)}{6 \cdot (0,6 \cdot 0,6)} = 0,44 \cong 0,5$$

čomu zodpovedá  $k_2 = 0,64$  (viď Tabuľka 4)

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

$$\frac{1}{k_3} = \frac{(c_{12})_{sk}}{(c_{12})_{id}} = \frac{\frac{1}{\varepsilon_{\xi}} + \frac{S_{vs}}{S_a} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{vs}} - 1\right)}{\frac{1}{\varepsilon_{\xi}} + \frac{1}{\varepsilon_{vs}} - 1} = \frac{\frac{1}{0,85} + \frac{6 \cdot (0,4 \cdot 0,4)}{6 \cdot (0,6 \cdot 0,6)} \cdot \left(\frac{1}{0,82} - 1\right)}{\frac{1}{0,85} + \frac{1}{0,82} - 1} = 0,913$$

$$k_3 = 1,0957$$

Potom

$$w_{\xi,sk} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot w_{\xi,id} = 0,56 \cdot 0,64 \cdot 1,0957 \cdot 23055 \cong 9054 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Za skutočné merné povrchové zaťaženie zvolíme hodnotu  $9054 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . 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.

3. Rozdelenie príkonu pece na články. Pre príkon 63 kW volíme trojfázovú pec so zapojením výhrevných článkov do trojuholníka (zo zadania).

$$P_{\xi,1} = \frac{P_p}{3} = \frac{63000}{3} = 21000 \text{ W} = 21 \text{ kW}$$

4. Výpočet rozmerov a hmotnosti výhrevného článku na jednu vetvu (1 fázu)

Počítame skupinu článkov pre príkon  $P_{\xi} = 21 \text{ kW}$  (1 fáza), napätie  $U = 400 \text{ V}$  a  $w_{\xi,sk} = 9054 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Rozhodli sme sa pre meander obdĺžnikového prierezu, potom:

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

$$a = \sqrt[3]{\frac{\rho_{\xi} \cdot P_{\xi}^2}{2 \cdot (m+1) \cdot m \cdot U^2 \cdot w_{\xi}}} = \sqrt[3]{\frac{1,15 \cdot 10^{-6} \cdot (21 \cdot 10^3)^2}{2 \cdot (10+1) \cdot 10 \cdot 400^2 \cdot 9054}} = 1,167 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

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  $b = b_n = 12 \text{ mm}$ .

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

$$l = \sqrt[3]{\frac{P_{\xi} \cdot U^2 \cdot m}{4 \cdot (m+1)^2 \cdot \rho_{\xi} \cdot w_{\xi}^2}} = \sqrt[3]{\frac{21 \cdot 10^3 \cdot 400^2 \cdot 10}{4 \cdot (10+1)^2 \cdot 1,15 \cdot 10^{-6} \cdot 9054^2}} = 90,31 \text{ m}$$

alebo

$$l = \frac{U^2 \cdot a \cdot b}{\rho_{\xi} \cdot P_{\xi}} = \frac{400^2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 10^{-3}}{1,15 \cdot 10^{-6} \cdot 21 \cdot 10^3} = 95,4 \text{ m}$$

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

- hmotnosť pásu na 1 fázu

$$m_v = \rho_h \cdot V = \rho_h \cdot l_{\text{vetva}} \cdot a \cdot b = 8400 \cdot 100 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 10^{-3} = 12,1 \text{ kg}$$

5. Kontrola merného povrchového zaťaženia

$$w'_{\text{č,sk}} < w_{\text{č,sk}}$$

$$w'_{\text{č,sk}} = \frac{P_{\text{č,1}}}{S_{\text{č,1}}} = \frac{P_{\text{č,1}}}{2 \cdot (a+b) \cdot l_{\text{vetva}}} = \frac{21000}{2 \cdot (1,2 \cdot 10^{-3} + 12 \cdot 10^{-3}) \cdot 100} = 7954,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$w'_{\text{č,sk}} = 7954 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} < w_{\text{č,sk}} = 9054 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

t.j. vyhovuje.

6. Výpočet geometrických parametrov výhrevného článku pre tvarovanie drôtu do konečnej formy (pozri obr. 3 a)):

- činiteľ zakrivenia  $k_1 = \frac{R}{a}$

je pomer polomeru zakrivenia meandra k hrúbke pásu, zvolíme  $k_1 = 4$ .

- činiteľ zvlňenia  $k_2 = \frac{B}{b}$

je pomer strednej šírky meandra k šírke pásu, zvolíme  $k_2 = 2$ .

Firma KANTHAL odporúča optimálne hodnoty činiteľov zakrivenia  $(k_1)_{\text{opt}} = 4$  až  $5$ ; zvlňenia  $(k_2)_{\text{opt}} = 2$  ÷  $3$ , preto aj my sme zvolili tieto odporúčané hodnoty.

Tvarové parametre meandra sú:

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

- stredná šírka meandra  $B_{\text{str}} = k_2 \cdot b = 2 \cdot 12 = 24 \text{ mm}$

- vonkajšia šírka  $B_{\text{vo}} = B_{\text{str}} + a = 24 + 1,2 \cong 25,2 \text{ mm}$

- vnútorná šírka  $B_{\text{vn}} = B_{\text{str}} - a = 24 - 1,2 \cong 22,8 \text{ mm}$

- dĺžka jednej vlny

$$l_v = 2 \cdot (B_{\text{str}} - 2 \cdot R) + 2 \cdot \pi \cdot R = 2 \cdot B_{\text{str}} + 2,28 \cdot R = 2 \cdot 24 + 2,28 \cdot 4,8 = 58,96 \cong 59 \text{ mm}$$

- počet vln meandra  $n_m = \frac{l}{l_v} = \frac{100}{59 \cdot 10^{-3}} \cong 1696$  vln

- krok meandra (stúpanie)  $h = 4 \cdot R = 4 \cdot 4,8 = 19,2 \text{ mm}$

- celková dĺžka meandra  $L_m = n_m \cdot h = 1696 \cdot 19,2 \cdot 10^{-3} = 32,56 \text{ m}$

7. Kontrola umiestnenia výhrevného článku (špirály) na 1 fázu na ploche uvedenej v zadaní:

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:

$$\begin{aligned}
 - \text{pre dno a strop:} & \quad \frac{x}{B_{vo}} \cdot y = \frac{0,6}{25,2 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,6 = 14,29 \text{ m} \\
 - \text{pre prednú a zadnú stenu:} & \quad \frac{x}{B_{vo}} \cdot z = \frac{0,6}{25,2 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,6 = 14,29 \text{ m} \\
 - \text{pre bočné steny:} & \quad \frac{y}{B_{vo}} \cdot z = \frac{0,6}{25,2 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,6 = 14,29 \text{ m}
 \end{aligned}$$

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

$$L_{\text{real}} = 2 \cdot \left( \frac{x}{B_{vo}} \cdot y + \frac{x}{B_{vo}} \cdot z + \frac{y}{B_{vo}} \cdot z \right) = 2 \cdot (14,29 + 14,29 + 14,29) = 85,7 \text{ m}$$

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

$$L_{\text{vyp}} = 3 \cdot L_m = 3 \cdot 32,56 = 97,7 \text{ m}, \quad \text{teda} \quad L_{\text{real}} > L_{\text{vyp}}$$

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

- 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.
- 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 firmy KANTHAL. Ak sa rozhodneme pre túto alternatívu, z ponúkaného sortimentu vyhovuje materiál KANTHAL DS, s fyzikálnymi vlastnosťami:

- *max. prípustná teplota:*  $1150 \div 1200 \text{ }^\circ\text{C}$
- *rezistencia:*  $\rho_\xi = 1,35 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$
- *merná hmotnosť:*  $\rho_h = 7250 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Stupeň čiernosti v katalógu fy KANTHAL nebol udaný, preto merné povrchové zaťaženie určíme graficky, t.j. pre teplotu  $800 \div 850 \text{ }^\circ\text{C}$  je

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

*Rozmery pásového meandra a jednej vetvy:*

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

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

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

zaokrúhľime 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):

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

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

- hmotnosť pásu na 1 fázu

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

### Tvar meandra

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

- polomer zakrivenia  $R = k_1 \cdot a = 4 \cdot 1 = 4 \text{ mm}$
- stredná šírka meandra  $B_{\text{str}} = k_2 \cdot b = 2 \cdot 10 = 20 \text{ mm}$
- vonkajšia šírka  $B_{\text{vo}} = B_{\text{str}} + a = 20 + 1 = 21 \text{ mm}$
- vnútorná šírka  $B_{\text{vn}} = B_{\text{str}} - a = 20 - 1 = 19 \text{ mm}$
- dĺžka jednej vlny  $l_v = 2 \cdot (B_{\text{str}} - 2 \cdot R) + 2 \cdot \pi \cdot R = 2 \cdot B_{\text{str}} + 2,28 \cdot R = 2 \cdot 20 + 2,28 \cdot 4 = 49,12 \cong 49 \text{ mm}$
- počet vln meandra  $n_m = \frac{l}{l_v} = \frac{51}{49 \cdot 10^{-3}} \cong 1041 \text{ vln}$
- krok meandra (stúpanie)  $h = 4 \cdot R = 4 \cdot 4 = 16 \text{ mm}$
- celková dĺžka meandra  $L_m = n_m \cdot h = 1041 \cdot 16 \cdot 10^{-3} = 16,66 \text{ m}$

### Uloženie meandrov do pracovnej komory pece

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

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

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

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

teda  $L_{\text{real}} > L_{\text{vyp}}$

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 firmy KANTHAL so spomínanými parametrami.