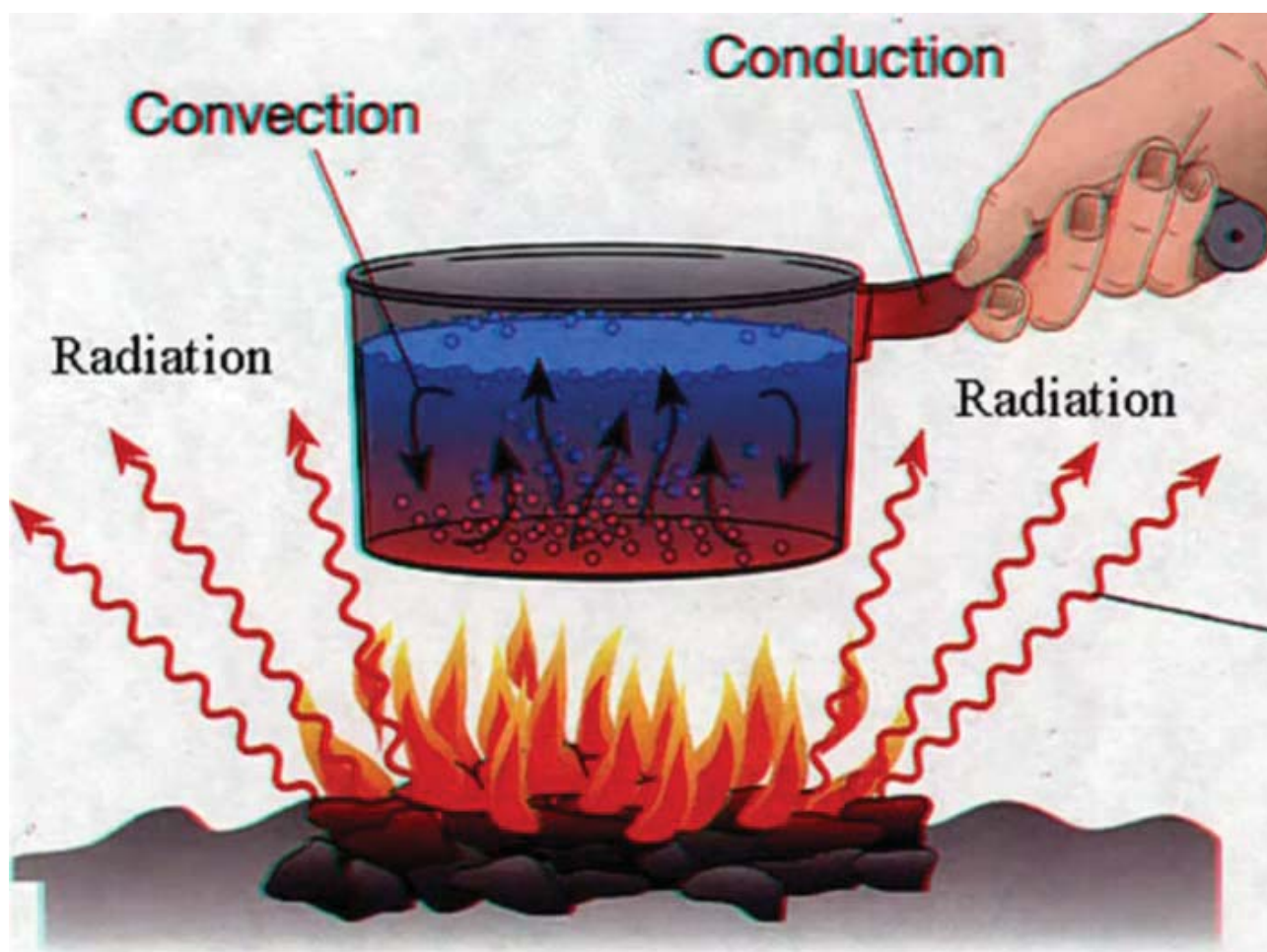


KEE/ZETP - ZÁKLADY ELEKTROTEPELNÝCH PROCESŮ



Přenos tepla vedením (kondukce)

Diferenciální rovnice vedení tepla v obecném tvaru – rovnice

Fourier-Kirchhofova

$$\vartheta = f(x; y; z; t)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) = a \cdot \Delta \vartheta$$

- Výraz v závorce je Laplaceův diferenciální operátor teploty $\Delta \vartheta$
- Součinitel a se nazývá součinitel teplotní vodivosti daného materiálu
- Součinitel teplotní vodivosti a zahrnuje tři fyzikální konstanty materiálu (měrnou vodivost, měrnou hmotnost a měrné teplo) a komplexně charakterizuje každou látku
- Čím vyšší je a , tím rychleji se těleso ohřívá nebo ochlazuje
- Odvozené diferenciální rovnice pro vedení tepla umožňuje určit rozložení teploty v uvažovaném tělese v každém místě a čase
- Závislost mezi tepelným tokem a teplotním spádem (gradientem) je dána Fourierovým zákonem:

$$d\underline{Q} = -\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \cdot d\underline{S} \cdot dt \quad (J; K; m^{-1}; m^2; s)$$

Přenos tepla prouděním (konvekce)

- Při předávání tepla prouděním užíváme pro výpočty Newtonova vztahu:

$$\Phi = \alpha_1 \cdot (\vartheta_{p1} - \vartheta_1) \cdot S \quad (W)$$

- α je součinitel přestupu tepla

$$\alpha = \alpha(l, \rho, p, w, v, \lambda, T, g, \tau, \dots) \quad (Wm^{-2}K^{-1})$$

- Součinitel přestupu tepla α závisí na mnoha činitelích, např. rozměry, tvar, plocha, drsnost povrchu, viskozita, rychlost proudění

• Přenos tepla sáláním (radiace)

Stefan-Boltzmanův zákon pro fyzikálně šedé těleso

$$E_s = \varepsilon \cdot E_c = \varepsilon \cdot \sigma_c \cdot \Theta^4 \text{ (W; m}^{-2}\text{)}$$

- $\sigma_c = 5,77 \cdot 10^{-8} \text{ (W; m}^{-2}\text{; K}^{-4}\text{)}$ je tzv. Stefan-Boltzmanova konstanta, resp. součinitel sálání absolutně černého povrchu

Zákon Wienův

- Wien odvodil důležitou závislost mezi vlnovou délkou λ a spektrálním zářením E_λ
- Spektrální záření E_λ je za dané teploty Θ největší pro vlnovou délku λ_{max} , která je nepřímo úměrná této teplotě Θ

$$\lambda_{max} = \frac{2,892 \cdot 10^{-3} E_c}{\Theta} \text{ (m; K)}$$

- Tento vztah znamená, že čím je vyšší teplota Θ , tím více se maximum záření posunuje na stranu kratších vlnových délek
- Je to tzv. Wienův posunovací zákon

ELEKTRICKÉ TEPLLO ODPOROVÉ

- Elektrická energie se mění v tepelnou podle Joulova zákona
- Rozdělení:
 - **Přímý odporový ohřev**
 - **Nepřímý odporový ohřev**

1. Přímý odporový ohřev

- Fyzikální vlastnosti vsázky jsou nelineárně závislé na její teplotě
- Vsázky pro přímý ohřev mohou být pevné (tyče, pásky, grafit) nebo tekuté (voda, sklo, elektrolyt)
- V elektrotepelných odporových zařízeních může vznikat teplo přímo ve vsázce nebo předmětu, kterým prochází elektrický proud
- Prochází-li vodičem o odporu R po dobu t proud I , vzniká ve vodiči teplo Q

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t = P \cdot t \quad (J \cdot s^{-1}; \Omega; A; s; W) \quad (2.1)$$

- Odpor vodiče o délce l (m) a průřezu s (mm²)

$$R = \frac{\rho \cdot l}{s} \quad (\Omega; \Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}; m; mm^2) \quad (2.2)$$

- ρ je specifický odpor materiálu
- U kovů je ρ vyjádřen odporem drátu délky 1 m a průřezu 1 mm²
- $\rho = 0,016$ (stříbro) až 1,66 (slitina FeCrNi)
- Poměr mezi těmito krajními hodnotami je tedy 1:100

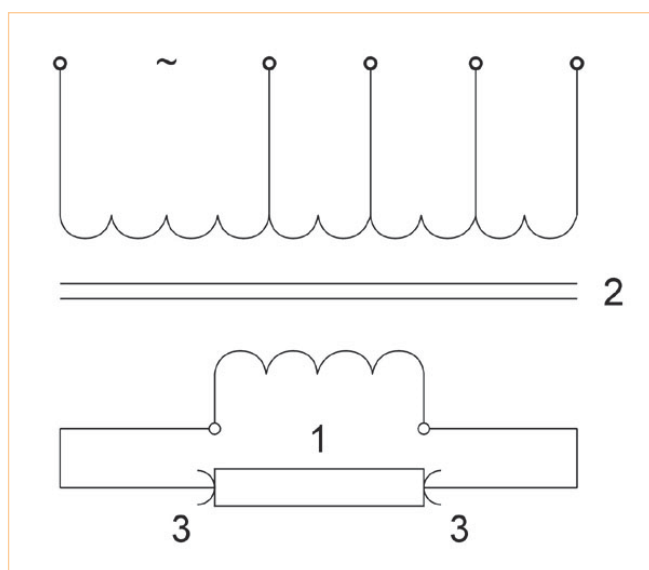
- U nekovů je specifický odpor ρ mnohem vyšší
- Pro tuhu platí $\rho > 10 \Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$
- Pro sility platí $\rho = 700$ až $1000 \Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$
- Měrný odpor u většiny materiálů je závislý na teplotě
- Při oteplení o $\Delta \vartheta$ je:

$$R_{\vartheta} = R \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta \vartheta) \quad (2.3)$$

- α je teplotní činitel odporu
- Pro většinu kovů je tento teplotní činitel odporu kladný
- Pro keramické materiály, sklo, tuhu, grafit může být záporný
- Tento teplotní činitel α není konstantní a je silně závislý na teplotě

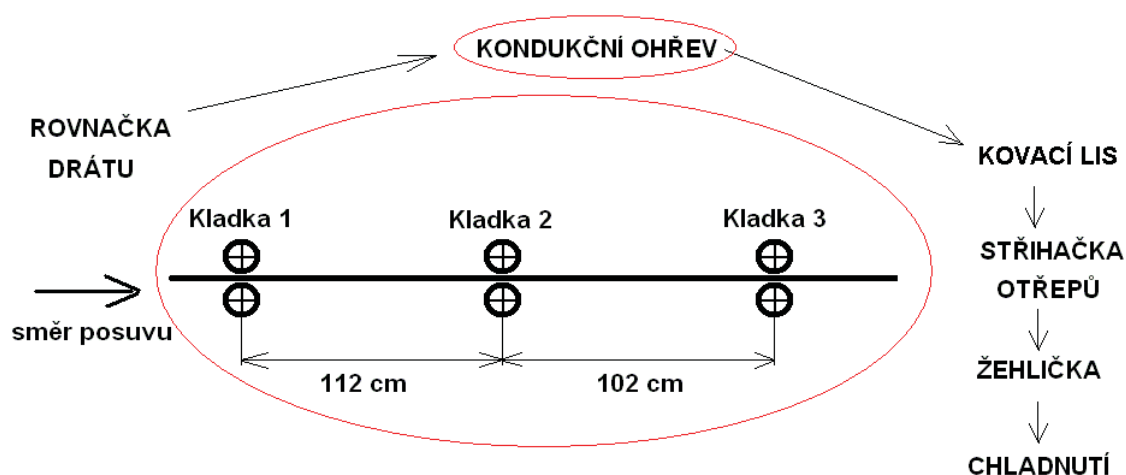
Ohřev dlouhých kovových tyčí, drátů a pásů

- Délka tyče musí být nejméně 10krát delší než její průměr, aby byl ohřev dostatečně rovnoměrný po celé délce, viz. obr.2.1



Obr. 2.1

Schéma reálného zařízení – kovací linky

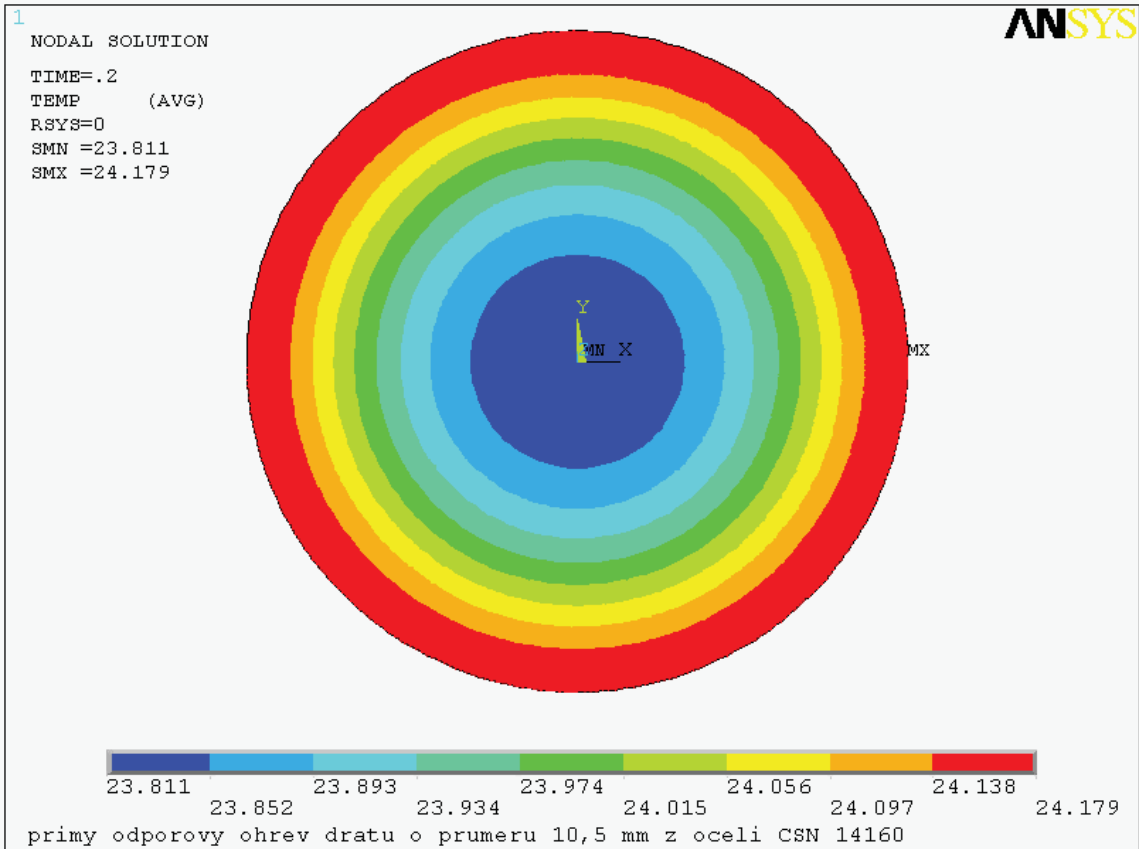


Popis elektrotepelného zařízení

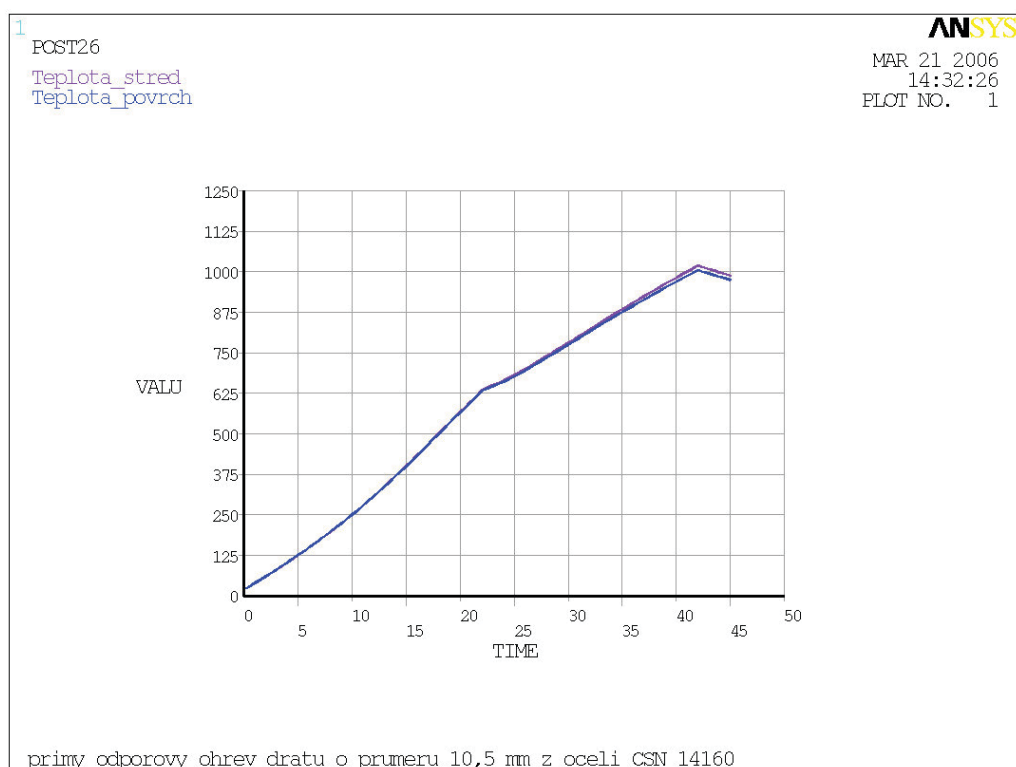


Ukázka provozu kovací linky

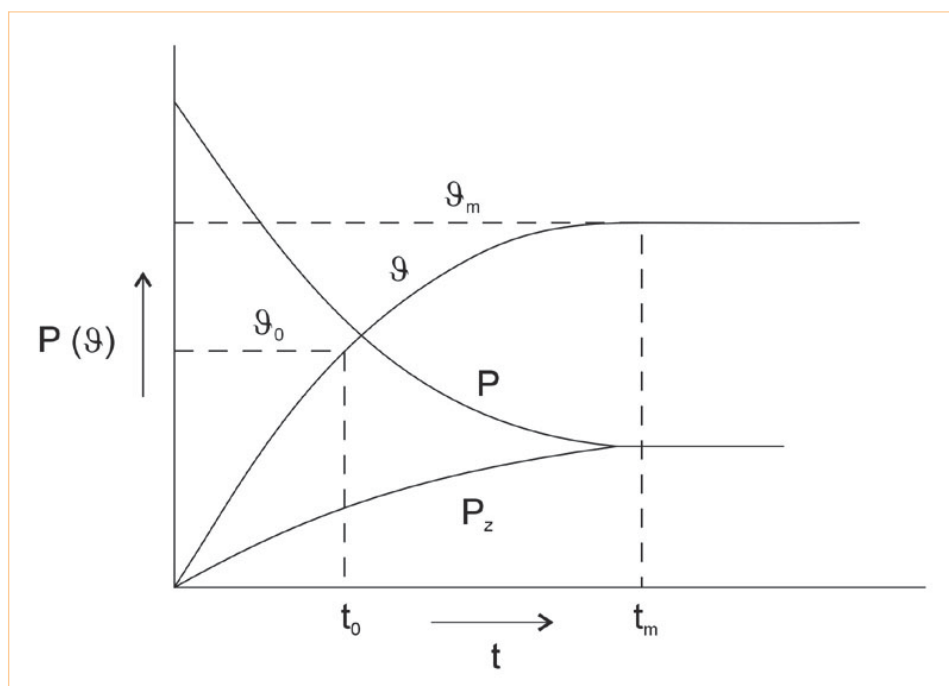




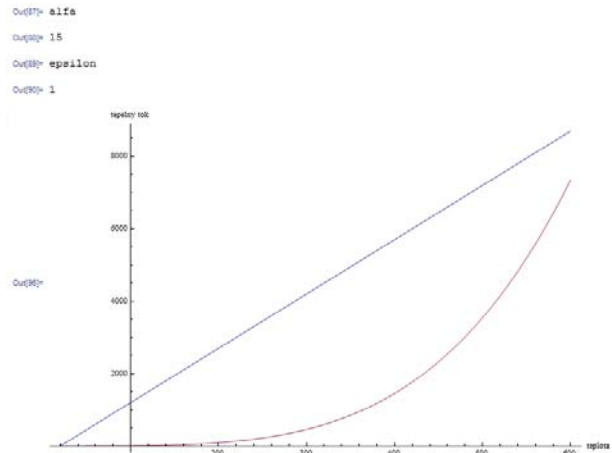
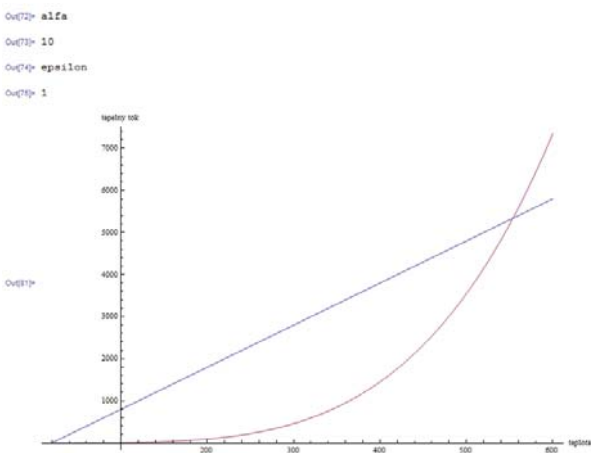
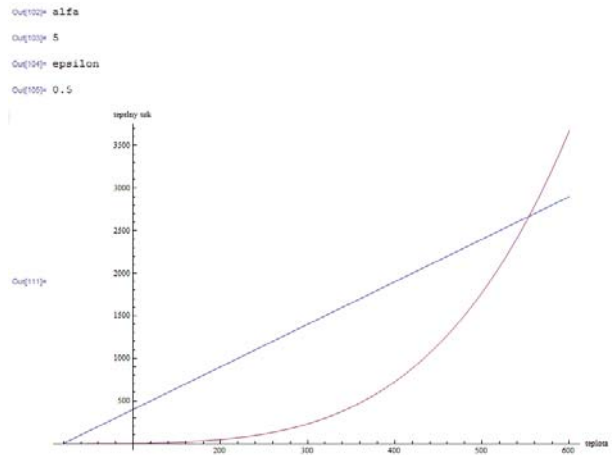
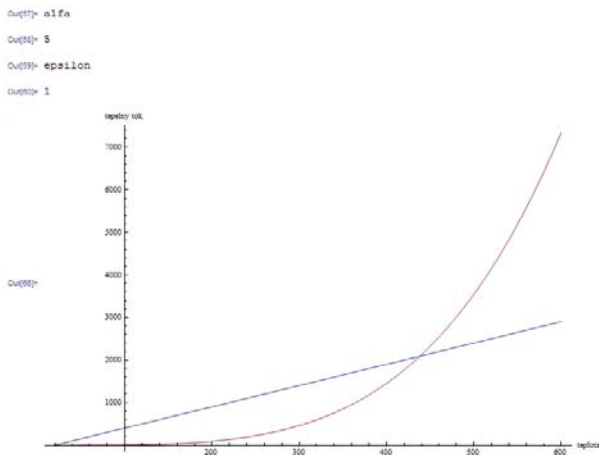
Výsledky simulace



- Optimální poměry nastávají, jestliže se činný odpor tyče rovná impedanci celého přívodního vedení
 - Tomu se blíží studená měděná tyč
 - Odpor oceli však při ohřevu stoupá až 7krát při ohřátí z 20 °C na 1200 °C
1. Pro impedanční přizpůsobení zvyšujeme během ohřevu napětí na tyči souhlasně s růstem odporu, a to přepínáním odboček na primáru transformátoru
 2. Účinník $\cos\varphi$ je u přímého odporového ohřevu nízký, je to proto, že se výrazně uplatňuje reaktance přívodů ke kontaktům u vysokých proudů
 3. Zapínáním a vypínáním transformátoru při ohřevu dochází ke kolísání napětí v síti
 4. U zařízení jednofázového nad 500 kW je nutno použít symetrizačního zařízení
- Pro zkrácení doby ohřevu jsou zařízení na přímý ohřev navrhována ve stovkách kW



Obr. 2.2



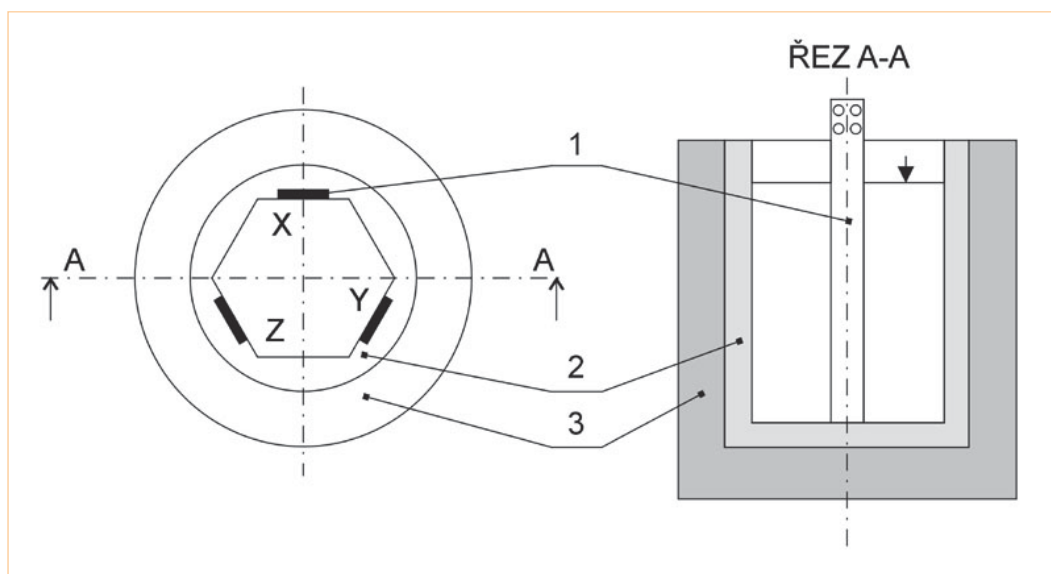
1. Rovná-li se příkon ztrátám, dosáhli jsme mezní teploty – obr. 2.2
2. Teplota ohřevu musí být menší než mezní
3. Největší teplo při přímém odpor. ohřevu vzniká při hloubce vniku:

$$a = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}$$

- Do teploty 768 °C (Curieův bod - ztráta feromagnetismu) je „a“ řádově v jednotkách mm
- Nad teplotu 768 °C je ρ asi 7krát větší a hloubka vniku pak nabývá velikosti desítek mm

2. Elektrodové solné lázně

- Solné lázně se používají k rychlému zahřátí ocelových součástí, např. kuliček nebo kroužků do kuličkových ložisek
- Součástky se umístí do speciálního koše ze žáruvzdorného pletiva
- S tímto košem se materiál ponoří do roztavené lázně
- Po krátké době se zahřeje na teplotu lázně
- Pak se vyjme a nastává například kalení (ponoří se do vody) nebo popouštění
- Používají se i pro tepelné zpracování barevných kovů nebo slitin při teplotách až 1400 °C
- Větší solné lázně mají tvar vany, menší jsou troj až šestihranné, viz. obr. 2.3



Obr. 2.3



- Elektrody mají velké stykové plochy, aby se zbránilo nadměrnému místnímu přehřátí
- Jsou kovové, vyrobené z materiálu vzdorujícím roztaveným solím
- Teplo vzniká průchodem elektrického proudu roztavenou solí
- Používané soli v tuhém stavu jsou nevodivé, proto je nutno použít pomocnou elektrodu k vytáhnutí oblouku, který roztaví tenkou vrstvu soli
- Další ohřev nastává průchodem proudu touto vrstvou a pomocné elektrody se odpojí
- Ke spouštění pece se někdy používá ohmický odpor jako náhrada za pomocnou elektrodu
- Rztavená lázeň má nízký ohmický odpor, proto je k napájení potřebný transformátor s možností regulace sekundárního napětí v rozmezí 4 až 24 V
- Podle pracovní teploty solné lázně se volí směs soli, která nejlépe vyhovuje
- Nejčastěji se používají soli kyanidů, červená krevní sůl, rozsah teplot 230 °C až 1300 °C

Složení směsi pro různé teploty solné lázně:

<i>Směs</i>	<i>Teplota (°C)</i>
55% KNO ₃ + 45% NaNO ₃	230 – 480
28% NaCl + 72% CaCl ₂	550 – 870
50% Na ₂ CO ₃ + 50% KCl	600 – 820
65% Na ₂ CO ₃ + 35% NaCl	650 – 880
20% KCl + 80% BaCl ₂	850 – 1300

- S ohledem na životnost stěn se požaduje, aby soli byly chemicky čisté
- Mechanické míchání lázně není nutné - elektrodynamické síly vyvolané proudovým polem umožňují dokonalé promíchání lázně, která má potom rovnoměrně rozloženou teplotu v průřezu celé pece

- Pokud je to možné, solné lázně neodstavujeme úplně z provozu
- V pracovních přestávkách snižujeme výkon tak, aby se lázeň udržela ještě v tekutém stavu
- Soli při tuhnutí zvyšují svůj objem, což by mohlo vést k prasknutí nádob
- **Proto se musí sůl při odstavení pece vypustit**

3. Nepřímý odporový ohřev

Návrh výkonu odporové pece

- Konstruktor odporové pece navrhne podle teploty v peci počet vrstev stěny, zvolí vhodný materiál a tloušťku jednotlivých vrstev
- Čím volí jakostnější materiál a čím silnější vrstvy uvažuje, tím menší ztráty bude pec mít, bude však tím dražší
- Proto je třeba vždy volit variantu ekonomicky i technicky optimální
- Potřebný příkon pece P_{pece} (kW) určíme z množství materiálu - vsázky, kterou je třeba za určitou dobu $t_{ohř}$ (hod) zahřát na požadovanou výstupní teplotu vsázky během jednoho pracovního cyklu
- Předpokládáme, že pec je před vložením vsázky vyhřátá na teplotu $\vartheta_{pece} = \vartheta_{vsázky}$

$$P_{pece} = K \cdot \frac{Q_{ohř}}{t_{ohř}} \text{ (kW)} \quad (2.4)$$

- K je součinitel bezpečnosti, má hodnotu 1,1 až 1,5
 - $Q_{ohř}$ množství tepla, které je třeba přivést do pece za dobu ohřevu $t_{ohř}$ (hod)
-
- $Q_{ohř}$ musí stačit nejen na ohřev vlastní vsázky, ale i na ohřev všech kovových částí pece, které se ohřívají současně
 - Také je nutno uvažovat s ohřátím určitého množství ochranné atmosféry
 - Součinitel bezpečnosti K zahrnuje potřebu zvýšeného výkonu pece, uvažíme-li zhoršení tepelné izolace vyzdívky během provozu, snížení napájecího napětí, atd.
 - Průběžné pece, které pracují bez přerušení, mají součinitel bezpečnosti 1,2 až 1,3
 - Pece pracující periodicky mají vyšší součinitel bezpečnosti, aby se mohly rychleji vyhřát na požadovanou teplotu
 - Odporové pece zatěžují síť při vysokém účinníku $\cos\varphi$
 - U větších odporových pecí od 10 kW výše užíváme zpravidla trojfázového napájení
 - Vypočtený příkon pece se tedy dělí třemi, čímž dostaneme zatížení každé fáze
 - Příkon každé fáze se rozdělí na menší části $P_{tčl}$, které se spotřebují v jednotlivých topných člancích

- Materiál pro topné články vybereme podle požadované teploty v peci
- Topné články se zhotovují buď ve tvaru spirál z odporového drátu kruhového profilu, nebo ve tvaru vlnovek z pásového materiálu
- Správně zvolený materiál vydrží v peci více než 10 000 pracovních hodin
- V odporových pecích se obvykle užívají dráty slabší než průměru $d = 2 \text{ mm}$
- Teplotní spád mezi topnými články a ohříváním materiálem závisí na povrchovém zatížení, tj. poměru příkonu, zavedeného do jednoho topného článku, děleného povrchem článku
- Povrchové zatížení se nejčastěji uvádí v jednotkách ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)

$$P_1 = \frac{P_{t\check{c}l} (W)}{S_{t\check{c}l} (cm^2)} \quad (2.5)$$

- Povrchové zatížení je udáváno v tabulkách pro ohřívání různých vsázek (ocel, mosaz, měď, hliník) v závislosti na teplotě
-
- Povrchové zatížení zjištěné z tabulek je nutno korigovat součinitelem $\Psi < 1$
 - Tento součinitel zohledňuje tu okolnost, že topné články nevyzařují volně všemi směry, nýbrž jsou umístěny ve žlábcích na bočních stěnách ($\Psi = 0,75$) nebo v kruhových drážkách ve stropě nebo na dně pece ($\Psi = 0,45$)
 - Zvolíme-li z opatrnosti menší hodnotu Ψ , prodloužíme tím délku topného článku, avšak současně prodloužíme jeho životnost

Vlastní výpočet topného článku

- Skutečné povrchové zatížení topného článku určíme z příslušných tabulek a diagramů redukcí součinitelem Ψ
- Dále můžeme stanovit rozměry a hmotnost topného vinutí
- Označíme si:
 - P (kW) příkon do jednoho topného článku
 - U (V) napětí na topném článku (může to být napětí fázové při spojení do hvězdy nebo sdružené při spojení do trojúhelníka)
 - R (Ω) odpor uvažovaného článku při pracovní teplotě
 - ρ ($\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$) měrný (specifický) odpor topného materiálu při pracovní teplotě
 - l (m) délka vodiče jednoho topného článku
 - d (mm) průměr vodiče kruhového průřezu
 - s (mm^2) průřez vodiče
 - O (mm) obvod vodiče
 - S_p (cm^2) povrchová plocha vodiče jednoho topného článku
 - P_{skut} ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$) skutečné měrné zatížení povrchu

- Pro P_{skut} platí $P = \Psi \cdot P_1$ ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)
- Hodnotu P_1 bereme z příslušného diagramu
- Napíšeme vztahy pro výpočet:

$$P = \frac{U^2}{10^3 \cdot R}; R = \frac{U^2}{10^3 \cdot P} = \rho \cdot \frac{l}{s}; l = \frac{s \cdot U^2}{10^3 \cdot P \cdot \rho} \quad (2.6)$$

$$P = P_{skut} \cdot S_p \cdot 10^{-3} \Rightarrow P_{skut} = \frac{10^3 \cdot P}{S_p} = \frac{10^2 \cdot P}{O \cdot l} \quad (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$$

$$l = \frac{s \cdot U^2}{10^3 \cdot P \cdot \rho} = \frac{10^2 \cdot P}{O \cdot P_{skut}} \quad (2.7)$$

- Ze vztahu (2.7) vyplývá:

$$O \cdot s = \frac{10^5 \cdot \rho \cdot P^2}{U^2 \cdot P_{skut}} \quad (2.8)$$

- Tento výraz budeme potřebovat pro výpočet rozměrů topného vinutí

Výpočet délky kruhového vodiče

- $O = \pi \cdot d$

- $s = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2$

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10^5 \cdot \rho \cdot P^2}{\pi^2 \cdot U^2 \cdot P_{skut}}} \text{ (mm)} \quad (2.9)$$

- Délka kruhového vodiče

$$l = \frac{R \cdot s}{\rho} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot P \cdot U^2}{4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot P_{skut}^2}} \text{ (m)} \quad (2.10)$$

- Hmotnost (G) odporového materiálu, je-li měrná hmotnost m (kg.m⁻³)

$$G = m \cdot l \cdot s \cdot 10^{-3} = m \cdot \sqrt[3]{\frac{10^2 \cdot \rho \cdot P^5}{16 \cdot \pi^2 \cdot U^2 \cdot P_{skut}^4}} \text{ (kg)} \quad (2.11)$$

Výpočet pásového topného článku

- s (mm²) průřez vodiče
- a, b (mm) rozměry pásového vodiče
- O (mm) obvod vodiče
- S_p (cm²) povrchová plocha vodiče jednoho topného článku
- $b / a = x$ substituce

- Obvod pásového vodiče

$$O = 2 \cdot (a + b) = 2 \cdot a \cdot (x + 1)$$

- Průřez vodiče

$$s = b \cdot a = x \cdot a^2$$

- Délku strany a určíme:

$$a = \sqrt[3]{\frac{10^5 \cdot P^2 \cdot \rho}{2 \cdot (x + 1) \cdot U^2 \cdot P_{skut}}} \quad (2.12)$$

- Délka pásu:

$$l = \frac{R \cdot s}{\rho} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot P \cdot U^2 \cdot x}{4 \cdot (x+1)^2 \cdot \rho \cdot P_{skut}^2}} (m) \quad (2.13)$$

- Ze vztahu (2.13) značí:
 - P – příkon jednoho topného článku
 - P_{skut} – skutečné měrné zatížení (W/cm^2) bereme z diagramu
- Hmotnost pásového vodiče:

$$G = m \cdot l \cdot s \cdot 10^{-3} = m \cdot \sqrt[3]{\frac{10^2 \cdot x^2 \cdot \rho \cdot P^5}{16 \cdot (x+1)^4 \cdot U^2 \cdot P_{skut}^4}} (kg) \quad (2.14)$$

4. Materiály a součásti elektrických odporových pecí s nepřímým ohřevem

- Normální odporová pec s nepřímým ohřevem je tvořena těmito základními částmi:
 1. Žáruvzdorná vyzdívka
 2. Tepelná izolace
 3. Skříň pece
 4. Topné články
 5. Podávací mechanismy a jejich pohony
- Kromě toho mohou být pece vybaveny zařízeními pro výrobu ochranné atmosféry nebo vakua
- Všechny pece jsou vybaveny přístroji pro měření a regulaci teploty a mohou mít i řízené zdroje proudu

Žáruvzdorná vyzdívka

- Ohraničuje uvnitř pracovní prostor pece
 - Musí při pracovní teplotě dostatečně odolávat žáru a musí být dostatečně pevná, aby dosahovala dlouhé životnosti
 - Materiály vyzdívky musí snášet prudké změny teplot, aniž by praskaly
-
- Musí být chemicky stabilní a nesmí reagovat ani se vsázkou ani s topnými články
 - Pro omezení tepelných ztrát má mít malý součinitel tepelné vodivosti a malou tepelnou kapacitu
 - Má mít velký měrný elektrický odpor, aby izolovala topné články umístěné přímo na vyzdívce
 - V odporových pecích užíváme nejčastěji šamotové díly, složené z 38% až 44% oxidu hlinitého Al_2O_3 , zbytek je oxid křemičitý SiO_2

Materiály pro tepelnou izolaci

- Mají přirozenou nebo umělou poréznost (přirozenou azbest, umělou magnezit, struska, oxid hlinitý a skleněná vata)

Skříň a konstrukce

- Obvykle se zhotovují z ocelového plechu a ocelových profilů
- Některé součásti se vyrábějí z litiny a ocelolitiny
- Tyto součásti pracují při normální teplotě a nejsou na ně kladeny žádné zvláštní požadavky

Topné články

- Leží v pásnu s vysokou teplotou a jsou na ně kladeny tyto požadavky:
- **Vysoký měrný elektrický odpor**
 - Topné články se někdy připojují přímo na síť
 - Odpor topných článků musí proto odpovídat danému výkonu
 - Čím menší je specifický odpor topného materiálu, tím větší je délka a tím menší je průřez topného článku
 - Dlouhé topné články mají krátkou životnost a jsou konstrukčně nepohodlné
- **Malý teplotní koeficient**
 - Čím větší je teplotní koeficient, tím větší je rozdíl odporů v teplém a studeném stavu
 - Téměř všechny materiály mají kladný teplotní koeficient, tzn., že s rostoucí teplotou roste měrný odpor materiálu
 - Proto je výkon odebíraný ze sítě jiný v teplém a studeném stavu
 - Při zapnutí studené pece odebírá ze sítě krátkodobě větší výkon
- Protože teplotní koeficient čistých kovů je přibližně $0,4\%/^{\circ}\text{C}$, dojde při ohřevu o $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ k zvětšení odporu na čtyřnásobek, proti studenému stavu
- Proto při zapnutí je zhruba čtyřnásobný, proti jmenovité hodnotě
- Z tohoto důvodu musí mít topné články malý teplotní koeficient a vyrábějí se ze slitin
- Pokud používáme čisté kovy (molybden, wolfram) musíme začínat se sníženým napětím
- **Stálost elektrických vlastností**
 - Některé materiály mění v průběhu času své elektrické vlastnosti - stárnou, měrný odpor se zvětšuje, výkon pece klesá
 - Projeví-li se stárnutí, lze regulačním transformátorem zvýšit napětí
- **Stálost rozměrů**
 - Některé materiály se v průběhu času prodlužují, a tak vznikají různé konstrukční potíže
 - Topné články se mohou prodloužit o 30 až 40% (musí být pro toto prodloužení ponecháno místo)

▪ **Opracovatelnost**

- Topné články je zapotřebí vyrobit ve tvaru drátů nebo pásů o různých průřezích
- Topné články musí být svařovatelné pro připojení vývodů

▪ **Materiály topných článků**

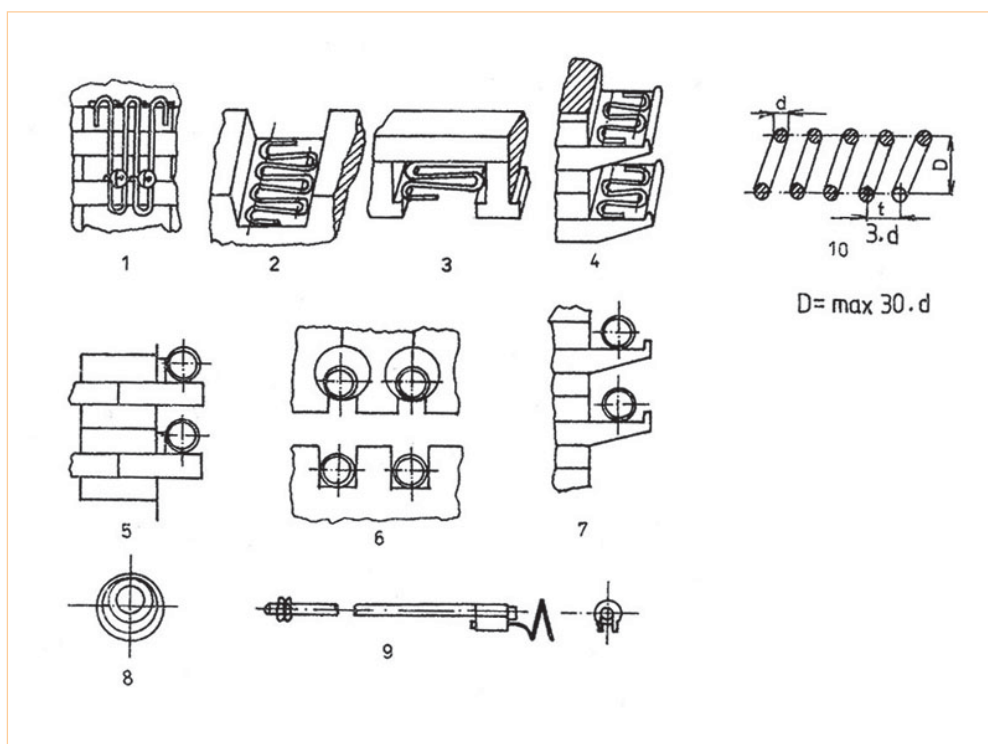
- Chromniklové slitiny se používají do 1200 °C
- Čím je větší obsah chromu, tím je materiál stálejší a odolnější proti oxidaci, ale hůře obrobitelný
- Proto se většinou používají slitiny, které obsahují asi 20% chromu a 80% niklu
- Přidání železa zlepšuje obrobitelnost a zvětšuje specifický odpor
- Zhoršuje však teplotní koeficient a omezuje žáruvzdornost
- V mnoha případech lze použít slitiny, které obsahují 15% až 17% chromu, 50% až 60% niklu a zbytek železa (do 1000 °C)
- Všechny chromniklové slitiny jsou nemagnetická (austenitická)
- Vysokou žáruvzdornost mají také slitiny obsahující chrom, hliník, železo
- Používá se 20% až 25% chromu a 4% až 5,5% hliníku
- Jejich pracovní teplota se pohybuje kolem 1300 °C

- Mají velký specifický odpor - $(1,4 \text{ až } 1,45) \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ a malý teplotní koeficient
- Nevýhoda je však křehkost, vznikající několikanásobným ohřátím a ochlazením
- Proto se nedoporučují topné články, které již v peci pracovaly, přemístit nebo svařovat
- Pro teploty do 1400 °C se používají topné články z karbidu křemíku (SiC)
- Specifický odpor SiC je značně velký $(0,6 \text{ až } 1,3) \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$
- Proto je možné vyrábět topné články ve tvaru tyčí o průměru 12 až 50 mm
- Montují se většinou vodorovně pod strop a na dno
- Topné články se mohou umísťovat i svisle na bočních stěnách
- SiC články jsou v teplém stavu křehké a mají relativně malou pevnost
- Musí se proto opatrně obsluhovat
- Jejich přívody mají být poddajné, aby se mohly roztahovat
- Jsou náchylné na rychlé ohřátí a stárnutí, tzn., že časem jejich odpor roste

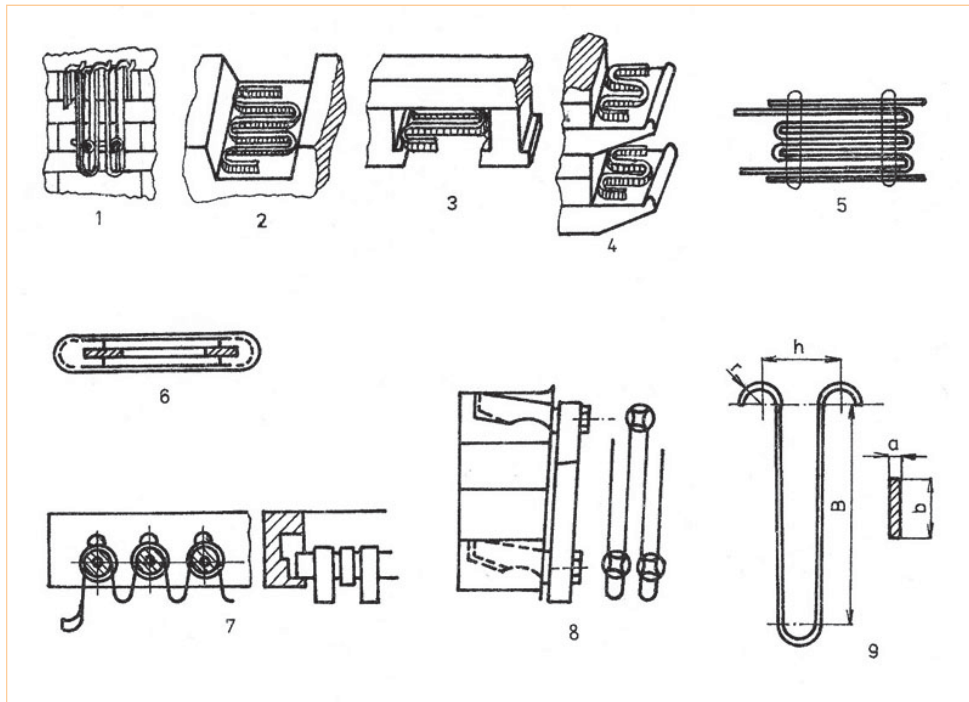
- Pece s SiC články musí být vybaveny regulačním transformátorem, kterým lze nastavit 50% až 110% jmenovitého napětí
- Protože všechny topné články nestárnou stejně, není dobré je řadit do série
- Do teploty 1200 °C až 1800 °C lze ve vzduchu použít dvojsilicid molybdenu (MoSi_2)
- Tento materiál má relativně malý specifický odpor, asi $0,25 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ při asi 20 °C a velký teplotní koeficient, takže specifický odpor při 1300 °C vzroste na desetinásobek
- Pece s těmito topnými články musí začínat s malým napětím
- Topné články z MoSi_2 se stávají při 1400 °C měkké a plastické, takže se nemohou instalovat vodorovně bez podpěry
- Do 1600 °C lze použít s podpěrou
- Do 1800 °C lze použít topné články ve tvaru písmena U, které jsou zavěšené
- Aktivní část se dělá o průměru 6 až 9 mm, přívody 12 až 18 mm
- Vyzdívká pece má mít vysoký obsah Al_2O_3
- Topné články MoSi_2 lze použít ve vzduchu do 1800 °C
- V ochranných plynech podle druhu plynu při nižších teplotách

- V ochranných plynech nebo ve vakuu lze použít topné články z molybdenu, wolframu, tantalu, niobu a také grafitu
- Molybdenové topné články lze v ochranném plynu provozovat do 2000 °C
- Ve vakuu je třeba však mít na zřeteli tu skutečnost, že při vysokých teplotách dochází k vypařování kovů
- Wolfram může ve vakuu nebo ve vodíku pracovat do 2700 °C, niob do 2300 °C
- Topné články z těchto materiálů se vyrábějí jako dráty, pásy, ale také jako tyče a plechy
- Grafitové články mohou pracovat ve vakuu nebo v ochranném plynu do 2600 °C
- vyrábějí se jako tyče, trubky a desky

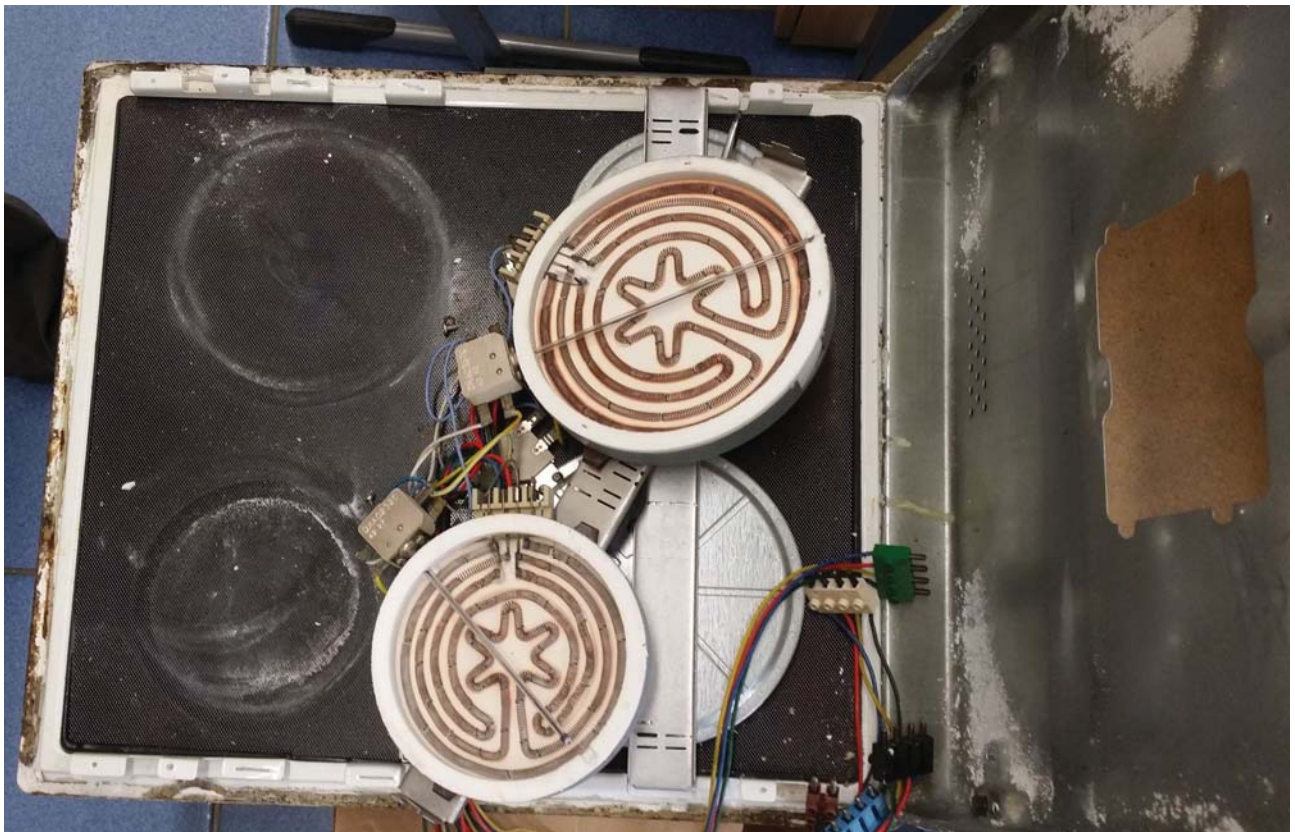
5. Konstrukce topných článků



Obr. 2.4



Obr. 2.5



- Topné články většiny průmyslových pecí se zhotovují z drátů nebo pásů
- **Na obr. 2.4 jsou konstrukce drátových topných článků a jejich uchycení na stěnách**
- Nejvíce se používá drát o průměru 3 až 7 mm
- Pro pece nad 1000 °C se doporučuje použít drát o průměru nad 5 mm
- Drátové elementy se vyrábějí ve tvaru meandrů
- Stoupání meandrů nemá být menší než trojnásobek průměru drátu a délka ramene nemá být větší než 30-ti násobek drátu
- U chromniklových a chromhliníkových drátů je průměr ohybu šesti až sedminásobek průměru drátu při teplotách do 1000 °C a čtyř až sedminásobek průměru drátu při teplotách nad 1000 °C
- **Na obr. 2.5 jsou konstrukce pásových topných článků**
- Vyrábějí se jako meandry různých rozměrů, které se zavěšují na stěny pomocí žáruvzdorných háků, které mohou být buďto kovové nebo keramické

- Topné články z pásovin se zavěšují někdy na keramické háky
- Používá-li se stínění, pak tato konstrukce není účelná
- Keramické konsoly jsou při chodu pece nevýhodné, protože zlomením konsoly a její výměnou se musí udělat nová vyzdívka
- Ve dně a ve stropě mohou být uloženy topné články v drážkách
- Takové topné články mohou tvořit vyměnitelné rámy
- Jsou-li v peci klenby, lze meandry zavěsit na keramické trubky (nad 1100 °C)
- Poměr stran pásů a/b se pohybuje mezi 5 až 20, ale většinou kolem 10
- Stoupání meandru je asi 1,8
- Poloměr ohybu pásu nemá být menší než trojnásobek tloušťky pásu (s ohledem na vznik trhlin při ohýbání)
- Výška meandru B, umístěného u stěny má být 150 až 600 mm, každých 200 mm mají být distanční vložky
- Jsou-li meandry u stropu a dna, má být výška meandru B (neplést s malým b) maximálně 250 mm

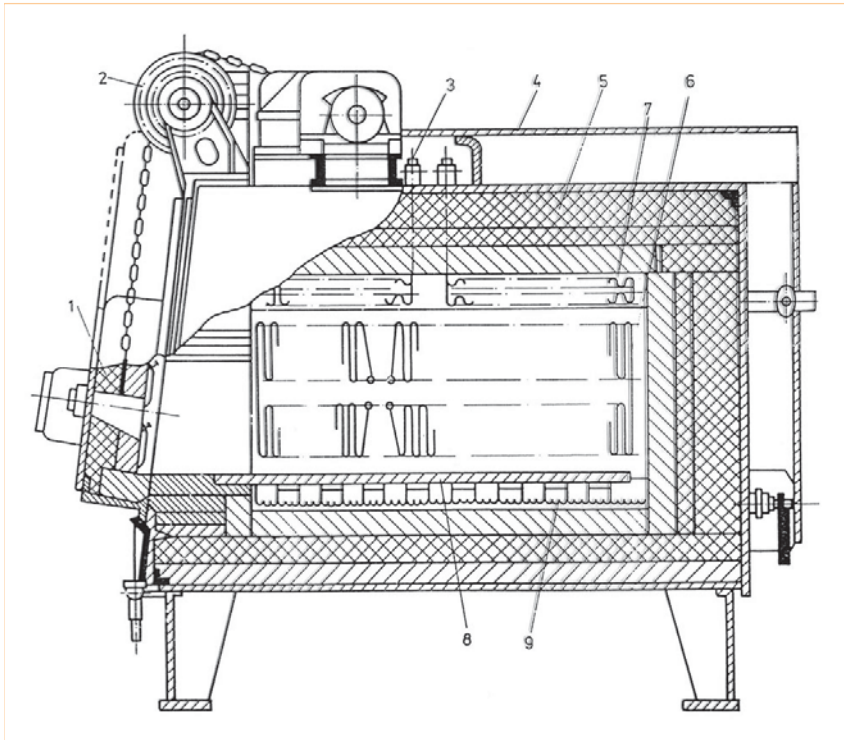
- Pro Cr-Al-Fe a teploty do 1200 °C nemá být rozměr B překročen u stěny 250 mm a u stropu a dna 150 mm
- Pro teploty topných článků do 1000 °C se používá u průmyslových pecí pásů o rozměrech (1,0 x 10,0) mm², při vyšších teplotách (2,0 x 20,0) mm²
- V pecích s nuceným oběhem vzduchu a pro elektrické ohříváče se používají topné články ve tvaru šroubovice, které jsou v určitých vzdálenostech uchyceny na izolátory
- Přívody topných článků do 1000 °C se zhotovují z chromniklové nebo chromové oceli a pro velmi vysoké teploty se používá slitin CrNi nebo CrAl
- Jejich průřez se volí 3 až 4 násobný proti průměru aktivní části
- V některých případech se používá při malých napětích ražených profilů nebo litých topných článků
- Lité topné články jsou spolehlivé a mají životnost až několik desítek tisíc hodin
- Dobře navržené chromniklové topné články mají životnost 10 000 až 15 000 hodin

- V pecích do 500 °C se používají různé typy topných článků
- Kromě spirálových a meandrových článků se používají ještě články, které mohou být zatížené velkým výkonem a dají se snadno vyměnit
- K těmto výměnným článkům patří rámové články, tj. ocelový rám s izolátory, na kterém je navinut drát nebo pás, tyčové články keramické, které jsou zasunuté do jednostranně zavažené trubky, mající na druhém konci izolátor a chromniklová spirála je navinuta na izolátoru
- Deskové topné články, keramická destička, kolem které je ovinut topný vodič anebo do níž je zapuštěn meandr a další
- Hodně rozšířené jsou „**trubkové topné články**“
- Jsou to ocelové trubky, v jejichž ose je spirála a prostor mezi trubkou a spirálou je vyplněn oxidem hořečnatým (MgO), který je výborným elektrickým izolátorem a tepelným vodičem
- Trubkové topné články lze použít k ohřevu vzduchu, vody, oleje, k tavení snadno tavitelných kovů, pro domácí a řemeslnické ohřívací zařízení

- Protože topný vodič je v ocelové trubce, je dobře chráněn proti oxidaci a mechanickému poškození
- Trubkové topné články se vyrábějí s výkonem od stovek W do několika kW a pro teploty až do 500 °C
- Pro vyšší teploty se používají žáruvzdorné trubky

6. Statické odporové pece

▪Komorová pec (Obr. 2.7)



- 1 – dveře
- 2 – buběn s protizávažím
- 3 – otvor pro termočlánky
- 4 – kovový plášť pece
- 5 – tepelná izolace
- 6 – topné články ve stěnách
- 7 – topné články v půdě pece
- 8 – žáruvzdorná deska
- 9 – topné články v podlaze

Obr. 2.7

- K všeobecně použitelným statickým pecím lze počítat pece komorové a šachtové
- Speciálnější jsou pece zvonové a elevátorové
- Jako u všech středo-teplotních pecí sestává vyzdívka komorové pece ze dvou vrstev – jedné žáruvzdorné a jedné tepelně-izolační
- Pecní prostor je nahoře uzavřen klenbou
- Pec sama má kovový plášť
- Na přední straně jsou dveře, kterými se pec plní a vyprazdňuje
- Malé pece jsou pro lepší obsluhu umístěny na podstavci, kdežto velké pece jsou umístěny přímo na zemi
- Kovové topné vodiče jsou většinou umístěny na bočních stěnách a dně, zřídka ve stropě

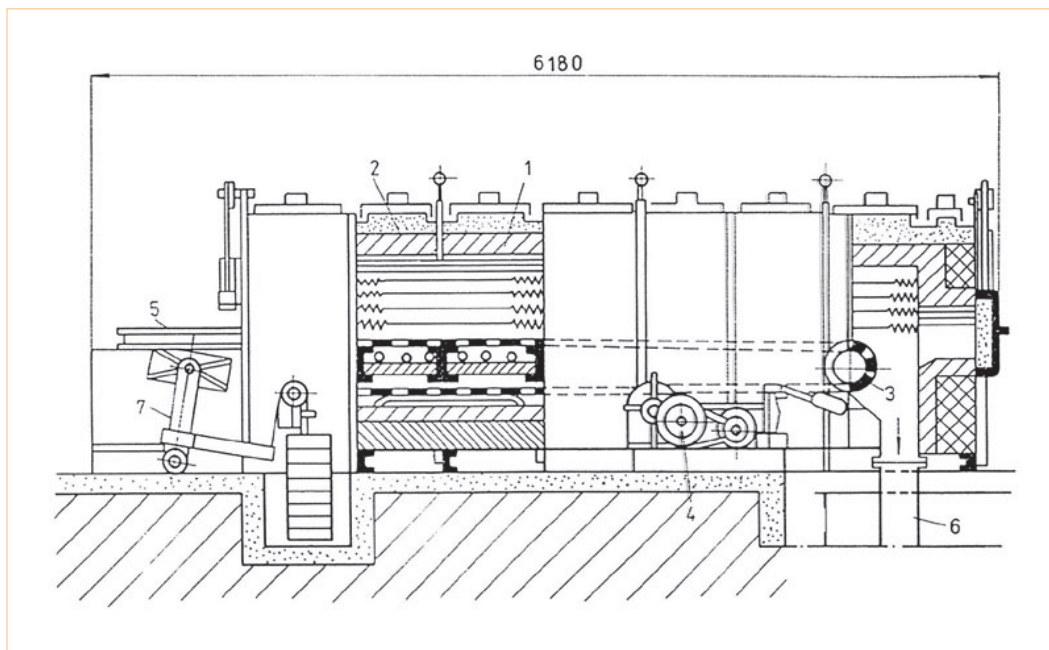
- U velkých pecí jsou pro zlepšení teplotního rozložení topné články zabudované i do zadní stěny a dveří
- Topné články, umístěné ve dně pece, bývají většinou přikryty žáruvzdornými deskami, na které se pak pokládají ohřívané předměty
- Komorové pece bývají zpravidla vybavené pohyblivými dveřmi, které jsou u malých pecí na ruční nebo nožní pohon, u větších pecí jsou ovládané hydraulicky, pneumaticky nebo elektromechanicky
- Dveře mají být vybaveny vlastním protizávažím a vedeny ve vodicích lištách
- V dolní poloze se dveře přitlačí na pec, takže netěsnosti jsou minimální
- Středo-teplotní komorové pece mají relativně velké tepelné ztráty, které dosahují 20 až 40 % jejich jmenovitého výkonu
- Mají také dlouhou dobu ohřevu a je problematické celý pecní prostor vyhřát na stejnou teplotu
- Jejich hlavní přednost spočívá v tom, že lze ohřívat libovolné předměty

7. Průběžné (kontinuální) odporové pece

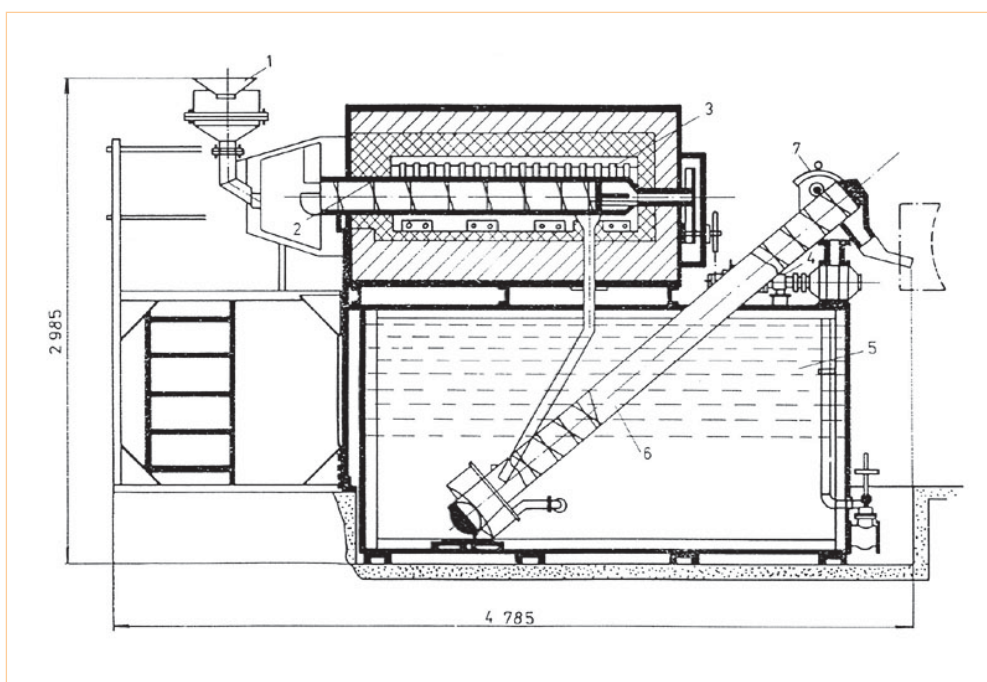
- Používají se tam, kde je předepsáno tepelné zpracování pro větší počet výrobků
- Průběžných pecí, které jsou většinou dimenzovány na nižší teploty, se staví celá řada různých druhů
- V těchto pecích lze podle technologického procesu provádět předepsaný ohřev, výdrž a ochlazování
- Obecně mají pece více teplotních pásem, která jsou samostatně napájena a regulována
- V případě pomalého ochlazování vsazených částí je k peci připojena ochlazovací komora, která podle požadované rychlosti ochlazování je vybavena buď tepelnou izolací, nebo vodním chlazením
- Několik průběžných pecí může být spojeno
- Většinou se spojují kalící a popouštěcí pece s kalícími lázněmi, čisticími a sušícími zařízeními
- V takových zařízeních procházejí nejdříve kalící pecí, pak kalícími lázněmi a poté čisticím zařízením
- Všechna tato zařízení pracují plně automaticky a mohou být proto použita při pásové výrobě

- Konstrukce průběžných pecí se liší podle způsobu dopravy materiálu v peci
- Pásové pece mají místo nístěje nekonečný dopravní pás, který je napnut mezi dvěma bubny, z nichž jeden slouží jako poháněcí
- Ohřívané součásti se uloží ručně nebo pomocí speciální automatiky na dopravní pás, po kterém pak putují do pece
- Pás je pro lehké součásti zhotoven z kovového pletiva, pro těžké součásti z ražených desek, které jsou vzájemně propojeny pomocí čepů nebo spojek
- Pro těžké kusy nebo velká zatížení se dopravní pás zhotovuje z řetězů

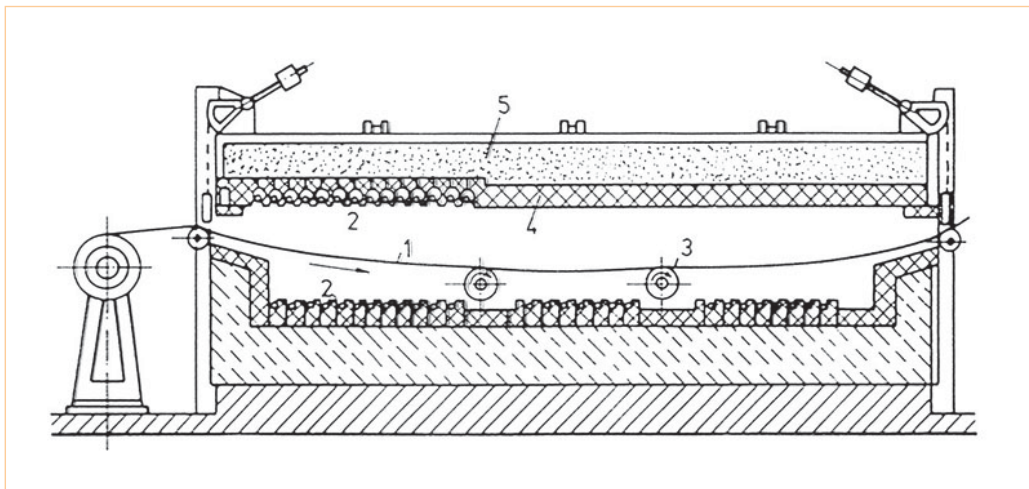
- Na obr. 2.11 je znázorněna pásová pec: 1 – žáruvzdorná vyzdívka, 2 – topné články NiCr, 3 – pás, 4 – pohon pásu, 5 – podávací stůl, 6 – prostor pro odběr materiálu, 7 – napínací zařízení
- Po obr. 2.11 následují další příklady kontinuálních pecí



Obr. 2.11



Obr. 2.12



Obr. 2.13

- Dopravní pás i bubny mohou být celé v peci, takže nedochází ke ztrátám akumulovaného tepla
- Protože bubny jsou v pásu s vysokou teplotou, musí se chladit vodou
- Tím dochází ke zvýšení tepelných ztrát
- Abychom nemuseli chladit vodou, je nutno vést spodní úroveň pásu mimo pásmo s vysokou teplotou
- Také bubny poháněcí i vrátný se umísťují mimo pásmo s vysokou teplotou
- Ztráty tepla, které se vyzáří z pásu, jsou v tom případě větší než při uspořádání s vodním chlazením
- I když je pás zhotoven ze žáruvzdorné, vysoce legované chromniklové oceli, dochází k jeho prodloužení
- Proto se ponechává spodní díl pásu volně viset
- Poháněcí buben je upevněn u výstupu pece
- U pásových pecí se umísťují topné články většinou na strop a dno, pod horní úroveň pásu

- Pásové pece se používají k ohřevu relativně malých částí na teplotu 900 °C
- Dále jsou v průmyslu využívány pece narážecí, karuselové, bubnové a pece s krokovým podáváním

8. Vysokoteplotní pece

- Topné články nemohou při normální atmosféře být z čistých nebo legovaných kovů, nýbrž musí být z různých modifikací karbidu křemíku nebo silicidu molybdenu (MoSi_2)
- Kovové nebo taky grafitové topné články mohou být provozovány jen v ochranných atmosférách nebo ve vakuu
- Žáruvzdorné legované materiály pro vnitřní konstrukce nelze při vysokých teplotách použít a nahrazují se karbidem křemíku a keramikou
- Ve vakuových pecích nebo v pecích s ochrannou atmosférou se používají součásti z molybdenu, niobu, wolframu a grafitu
- Stěny jsou ze tří vrstev
- Vnitřní vysokoteplotní vrstva je z vysoce žáruvzdorného materiálu, který má vysoký obsah oxidu hlinitého
- Střední vrstva je namáhána menší teplotou, ale více tepelně izoluje
- Bývá zhotovená z různých druhů šamotu
- Třetí vrstva je izolační

- Většina vysokoteplotních pecí jsou pece statické
- Většinou jsou to pece komorové, šachtové nebo válcové
- Stavějí se však i průběžné a průchozí pece se zařízením z karbidu křemíku nebo keramiky, karuselové a krokovací pece
- Pece s topnými články z karbidu křemíku se používají do $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, z dvojsilicidu molybdenu do $1750\text{ }^{\circ}\text{C}$, pece s molybdenovými topnými články se používají ve vakuu do $1650\text{ }^{\circ}\text{C}$, v ochranné atmosféře do $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Vakuové pece s grafitovými elektrodami se používají do $2600\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Následuje ukázka vysokoteplotní pece

9. Nízkoteplotní pece

- Odlišují se od středoteplotních a vysokoteplotních jednak konstrukcí a jednak přenosem tepla
- Největší část tepla se přenáší konvekcí
- Hranice mezi nízkoteplotními a středoteplotními pecemi leží mezi 600 až 700 °C
- Tato skupina pecí zahrnuje všechny druhy sušících pecí, kalicí pece a všechny pece pro tepelné a tepelně-mechanické zpracování kovů
- **Pece s přirozeným prouděním vzduchu**
 - jsou nejjednodušší nízkoteplotní pece, vyráběny s přirozeným prouděním vzduchu
 - Jsou to skříňové nebo komorové pece různého tvaru s topnými články ve dně nebo bočních stěnách
 - Ohřívané předměty se musí odstítnit od topných článků, aby nedošlo k přehřátí
 - Přenos tepla se děje přirozenou konvekcí
 - Protože však koeficient sdílení tepla je při přirozené konvekci malý, mají tyto pece malou rychlost ohřevu a tím i malou výkonnost

▪ **Pece s nuceným prouděním vzduchu**

- Tepelné zpracování předmětů lze zlepšit umělým (nuceným) prouděním vzduchu
- Proto jsou ve stropní části pece umístěny ventilátory, které teplý vzduch nasávají a vedou do spodní části pece
- Odtud teplý vzduch stoupá opět nahoru
- Takový uzavřený oběh vzduchu zvětšuje účinnost pece
- Má-li se však vysoušet jakostně, musí se vypařená vlhkost ze vzduchu odstranit
- Proto se používá vzduchový oběh s podílem čerstvého vzduchu, který nahrazuje ztráty při vysušování
- Maximální teplota se u těchto pecí pohybuje od 200 do 300 °C
- Proto mohou být všechny vnitřní části z oceli a mnohdy chybí i žáruvzdorná vyzdívka
- Pecní komora sestává z jedné vnitřní a jedné vnější konstrukce
- Prostor mezi konstrukcemi je vyplněn lehkou tepelnou izolací
- Tyto pece jsou vybaveny ventilátory, které zaručují stejnoměrný uzavřený oběh vzduchu

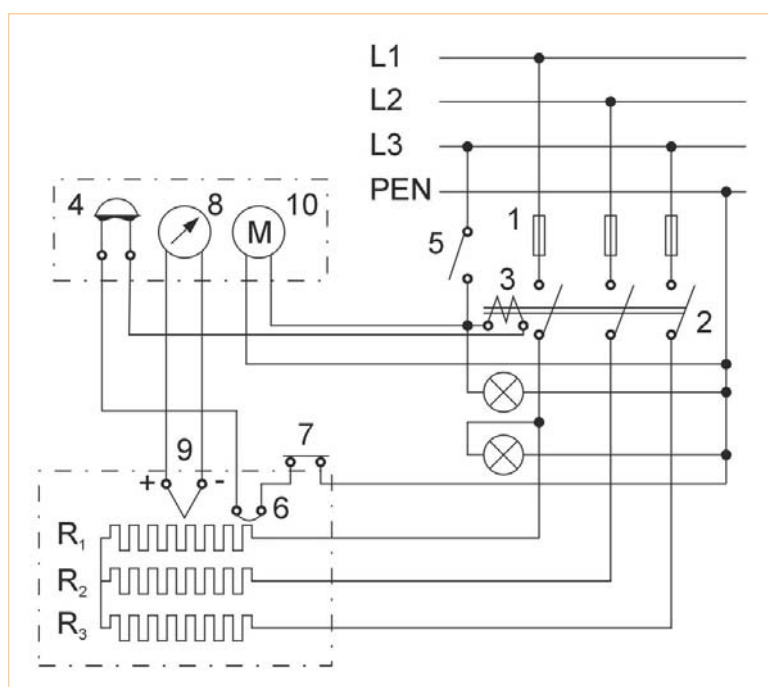
- Vzduch se přitom odsává z pece, vede se přes topné články, kde se ohřívá, a pak se vrací do pece, kde ohřátý vzduch odevzdává teplo ohříváním předmětům – pak se koloběh opakuje
- Je-li pec velká a požadavky na rovnoměrnost vysoké, je složité vytvořit odpovídající proudění v peci
- V takových případech se umísťuje ventilátor a topná tělesa do zvláštní komory – ohříváče vzduchu

▪ **Komorová pec s nucenou cirkulací vzduchu ohříváního vestavným elektrickým ohříváčem (obr. 2.15)**

- Ventilátor prohání vzduch přes ohříváč a ten pak do pece tak, aby vzniklo rovnoměrné rozložení teplot
- Při výstavbě takovéto pece se používá ventilátor s velkou rychlostí proudění
- Zvětší se tak koeficient sdílení tepla

10. Zapojení a regulace elektrických odporových pecí

- Nejběžnější způsob elektrického zapojení odporové pece je uveden na obr. 2.16

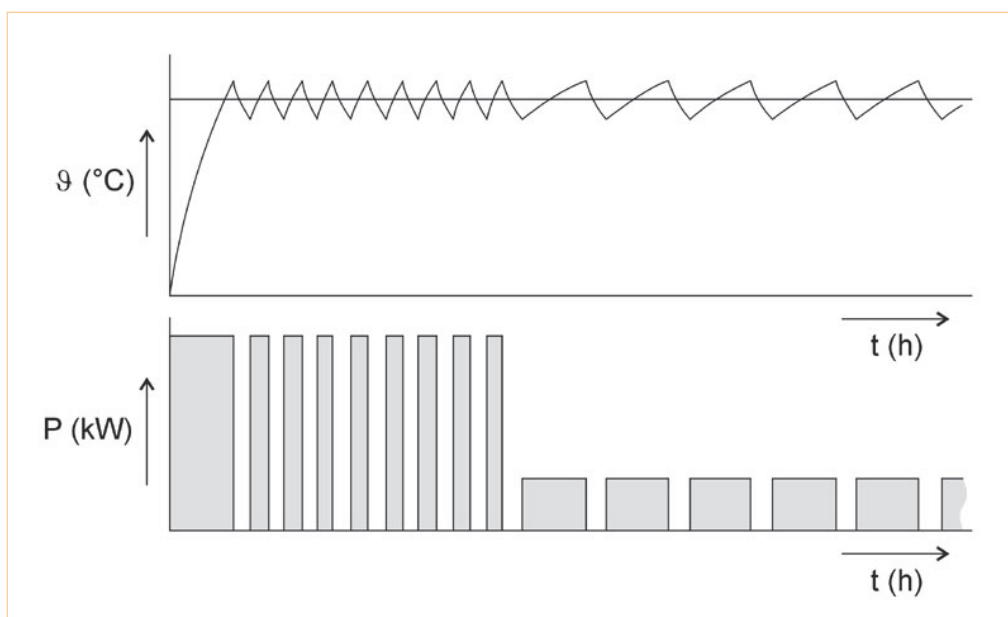


Obr. 2.16

- Elektrická odporová pec, zapojená podle obr. 2.16 je připojena k trojfázové síti s nulovým vodičem prostřednictvím stykače 2
 - Jištění je provedeno pojistkami 1
 - Topná vinutí pece představují odpory o stejné hodnotě R_1 , R_2 , R_3
 - Pec zapneme vypínačem 5
 - Sepnutím tohoto vypínače uzavřeme pomocný spínací obvod, složený z těchto prvků:
 - Cívka stykače 3
 - Rtuťový spínač automatického regulátoru teploty 4
 - Pojistkový topný drátek v peci 6
 - Dveřní kontakt 7
 - Chod pece je signalizován rozsvícením červeného světla
 - Současně také startuje motorek automatického regulátoru teploty 10
 - Po nabuzení spínací cívky 3 sepne stykač 2 a připojí topné články k síti
 - Termočlánek 9 dodává napětí pro přístroj ukazující teplotu v peci
-
- Při dosažení požadované teploty se překlopí rtuťový spínač automatického regulátoru teploty 4, v ovládacím obvodu je přerušena proud a stykač 2 odepne topné články od sítě
 - Ve schématu na obr. 2.16 je možná regulace teploty v peci pouze vypínáním a zapínáním celého příkonu

Regulace teploty

- V průmyslu se užívá regulace skokové nebo plynulé
- Skoková regulace teploty se dosáhne nejjednodušeji vypínáním a zapínáním celého příkonu pece
- Dále můžeme využít přepínání odporových sekcí hvězda, trojúhelník, nebo přepínání skupin odporových článků
- Průběh teploty a příkonu v odporové peci při jednopólové a dvoupólové regulaci je uvedena na obr. 2.17



Obr. 2.17

- V první části obr. 2.17 je znázorněna jednopólová regulace zapnuto, vypnuto
- V druhé části obrázku je uvedena dvoupólová regulace teploty a příkonu při použití přepínání odporových sekcí trojúhelník – hvězda

Plynulá regulace

- Úkolem regulace teploty v odporové peci je trvale a přesně udržovat požadovanou teplotu v pracovním prostoru, nebo reagovat na změny podle předem připraveného programu
- Pro plynulou regulaci příkonu elektrické odporové pece používáme polovodičových prvků, zapojených v přívodu k peci

Děkuji za pozornost

- Použitá literatura:
 - Rada J., Elektrotepelná technika, Praha : SNTL 1985
 - Hradílek Z., Lázničková I., Král V., Elektrotepelná technika, Praha 2011, ISBN 978-80-01-04938-9
 - Hradílek, Z., Elektrické teplo, Skripta VŠB Ostrava 1989
 - Hradílek Z., Přednášky elektrotepelná technika
 - Internet
 - Youtube