

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh elektrické odporové muflové pece

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr BOUCHAL**

Osobní číslo: **E15N0100P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektroenergetika**

Název tématu: **Návrh elektrické odporové muflové pece**

Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte možnosti použití muflových pecí.
2. Proveďte tepelný a elektrický výpočet muflové pece na pracovní teplotu 900 C, průměr mufle 1 m, výška 2 m, rychlost ohřevu (150 - 200) C/hod.
3. Navrhněte základní konstrukční provedení.
4. Proveďte úvahu o provozních vlastnostech a energetické náročnosti navržené pece.




Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


1. Dodá vedoucí práce.

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**
Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návržení elektrické odporové muflové pece. Text je rozdělen do tří částí. První se zabývá teoretickým popisem tepelných přenosů, základními elektrotepelnými zařízeními, jejich rozdělením a použitím materiálu pro dané části elektrotepelných zařízení. Druhá část obsahuje návrh konstrukčního provedení, tepelný výpočet a elektrický výpočet. V třetí části je úvaha o provozních vlastnostech a energetické náročnosti navržené pece.

Klíčová slova

Elektrotepelná zařízení, elektrická odporová pec, sdílení tepla, muflová pec, topný článek, tepelný výpočet, elektrický výpočet.

Abstract

This diploma work contains an electric resistance muffle furnace proposal. The text is divided into three parts. The first part is about the theoretical description of thermal transfers, basic electro - thermal devices, their distribution and use of material for given parts of electro-thermal equipment. The second part contains a design proposal, thermal calculation and electrical calculation. The last part discusses the operational properties and energy performance of the proposed furnace.

Key words

Heating devices, electric resistance furnace, heat transfer, muffle furnace, heating element, thermal calculation, electrical calculation.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 18.5.2017

Petr Bouchal

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc. a ing. Jiřímu Lucákovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ	10
1 ELEKTROTEPELNÁ ZAŘÍZENÍ	11
1.1 PŘENOS TEPLA	11
1.1.1 Ztráty tepla rovnou stěnou	14
1.1.2 Akumulované teplo	16
1.2 ELEKTROTEPELNÁ ODPOROVÁ ZAŘÍZENÍ.....	16
1.2.1 Přímý odporový ohřev	17
1.2.2 Nepřímý odporový ohřev	18
1.3 POUŽITÍ ODPOROVÝCH PECÍ V PRŮMYSLU	19
1.4 MATERIÁLY PRO ELEKTRICKÉ PECE	21
1.5 TOPNÉ ČLÁNKY	22
1.5.1 Kovové materiály	24
1.5.2 Nekovové materiály	25
1.6 SENZORY, REGULACE TEPLoty A ZAPOJENÍ ELEKTRICKÝCH ODPOROVÝCH PECÍ	26
1.6.1 Tepelné senzory	26
1.6.2 Regulační systémy.....	29
1.6.3 Zapojení pecí	33
1.7 MUFLOVÉ PECE.....	34
2 NÁVRH ELEKTRICKÉ ODPOROVÉ MUFLOVÉ PECE	36
2.1 KONSTRUKČNÍ PŘEVODENÍ	37
2.1.1 Výpočet hmotnosti pece	38
2.2 TEPELNÝ VÝPOČET	42
2.2.1 Tepelné ztráty prázdné pece	43
2.2.2 Kontrola teplot na rozhraních	46
2.2.3 Akumulované teplo ve vyzdívce a vsázce	48
2.3 ELEKTRICKÝ VÝPOČET.....	49
2.3.1 Výpočet příkonu pece.....	50
2.3.2 Výpočet topného článku.....	51
2.3.3 Regulace teploty v peci	55
3 ZHODNOCENÍ PRÁCE	56
3.1 PROVOZNÍ VLASTNOSTI.....	56
3.2 ENERGETICKÁ NÁROČNOST.....	56
ZÁVĚR	58
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	59
KATALOGOVÉ LISTY VÝROBCŮ	60

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na návrh elektrické odporové muflové pece.

Cílem práce je tedy navrhnout elektrickou odporovou muflovou pec, která bude pracovat při provozní teplotě 900 °C a bude ohřívat vsázku z konstrukční oceli ve tvaru kvádrů rychlostí 150-200 °C/hod. V prvním bodě bude nutné si uvědomit, jaké materiály mohou pro tento typ pece a její zadanou provozní teplotu použít, podle vnitřních a vnějších rozměrů pece, které byly zadány. Jako první vypočítám jednotlivé tloušťky stěny pro dané vrstvy a jejich povrchy, z kterých mohu určit přibližnou hmotnost pece a využiji je i při tepelných výpočtech.

V dalším bodě bude třeba ověřit, jaké tepelné ztráty pro mnou zvolené materiály budou stěny pece vykazovat pro prázdnou pec bez vsázky, akumulované teplo a pro ohřev vsázky. Díky těmto výpočtům získáme představu o celkových tepelných ztrátách a budu schopen provést elektrický výpočet, kde navrhnu potřebný výkon, který je potřeba do pece přivádět. Po těchto výpočtech zvolím vhodný materiál pro topný článek a provedu potřebné výpočty pro jeho navržení.

Posledním bodem bude úvaha o provozních vlastnostech a energetické náročnosti mnou navrhované pece, případně její nedostatky.

Seznam symbolů

Tepelné veličiny

Q	tepelná energie [J]
Q_z	tepelné ztráty [W]
Q_{aku}	akumulované teplo [J]
Φ	tepelný tok [W]
λ	součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
S	plocha [m^2]
A	povrch [m^2]
F	střední plocha [m^2]
V	objem [m^3]
ϑ	teplota [$^{\circ}\text{C}$, K]
l	tloušťka materiálu [m]
c	měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
γ	měrná hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
α	součinitel teplotní vodivosti daného materiálu [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
$\Delta\vartheta$	střední teplotní spád [K]
m	hmotnost [kg]

Elektrické veličiny

P	elektrický výkon [W]
I	elektrický proud [A]
U	elektrické napětí [V]
R	elektrický odpor vodiče [Ω]
i	okamžitá hodnota elektrického proudu [A]
p	povrchové zatížení [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$]
ρ	rezistivita [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]
d	průměr [mm]
l	délka [m]
$t_{\text{ohř}}$	doba ohřevu vsázky [s]
t_1, t_2	čas pro roztápnění pece [s]
η	účinnost [%]

1 Elektrotepelná zařízení

V elektrických strojích jde hlavně o přeměnu mechanické energie na elektrickou (generátory) nebo naopak z energie elektrické na mechanickou (motory). V těchto strojích dochází při přeměně energie k nežádoucím ztrátám formou tepla. U zařízení elektrotepelných je elektrická energie záměrně přeměněna na tepelnou. Mezi první elektrotepelná zařízení patřila velmi jednoduchá odporová a oblouková zařízení. Postupem času se z poměrně jednoduché problematiky tepelných zařízení stal rozsáhlý vědní a technický obor. Rozdělením elektrotepelných zařízení podle principů přeměny elektrické energie na teplo, můžeme sledovat na tabulce rozsáhlost tohoto oboru.

Elektrotepelná zařízení	
1.)	Odporová zařízení
2.)	Výbojová (oblouková) zařízení
3.)	Indukční zařízení
4.)	Dielektrická zařízení
5.)	mikrovlnná zařízení
6.)	Plazmová zařízení
7.)	Elektronová zařízení
8.)	Laserová zařízení
9.)	Sálavé panely a infrazářiče

Tab. 1.1 Rozdělení elektrotepelných zařízení podle principu ohřevu

V dnešní době se ve velké míře využívají elektrické pece, které pozvolně vytlačují z průmyslu pece na tuhá paliva. Je to způsobeno hlavně tím, že v elektrických pecích nevznikají žádné zplodiny, které by mohly znečišťovat vsázku i okolí. Mezi další výhody patří schopnost dosáhnout vyšších teplot a přesnější regulace požadovaných teplot pro určité technologické procesy a materiály. S vývojem elektrických pecí se musely zvýšit i nároky na regulační techniku, teplotní senzory a akční členy, na kterých je postaven základ elektrotepelných zařízení.

1.1 Přenos tepla

Základní fakt o teple nám říká, že teplo se vždy šíří z místa o vyšší teplotě do míst s teplotou nižší. Šíření tepla se dělí na tři základní způsoby vedením, prouděním, sáláním a to buď samostatně, nebo častěji jejich kombinacemi. Uvažujeme-li přenos tepla v pecním prostoru, pak je do ohřívání materiálu přenášeno teplo hlavně sáláním a prouděním. Leží-li vsázka na dně pracovního prostoru pece větší plochou a dno je opatřené také

topnými články, pak se uvažuje i přenos tepla vedením. Mezi základní poznatky o způsobech šíření tepla patří:

- **Šíření tepla vedením (kondukce)**

Teplu se šíří postupným předáváním kinetické energie mezi částicemi s vyšší střední kinetickou energií a částicemi s energií nižší vlivem vzájemných srážek. Dochází pouze ke kmitání jejich rovnovážných poloh. Sdílení tepla vedením je typické pro tuhá tělesa. Mohou však nastat situace, kdy dochází k šíření tepla vedením i v prostředí tekutém a plynném, je-li současně zabráněno sdílení tepla prouděním. Pro tuhá tělesa je to jediný možný způsob přenosu tepla. Rozeznáváme dva stavy šíření tepla tímto způsobem. Prvním je stacionární neboli ustálený stav šíření tepla. Teplota tělesa je konstantní a zůstává v každém bodě s časem konstantní. Druhým případem je nestacionární neboli neustálený stav šíření tepla. V tomto případě se teplota každého bodu mění s časem (vyhřívání a ochlazování pece, ohřev vsázky) a můžeme psát diferenciální rovnice vedení tepla v obecném tvaru, kterou je rovnice Fourier – Kirchhofova.

Základní rovnicí pro ustálený stav vedení tepla je empirický Fourierův zákon:

$$\Phi = -\lambda * S * grad \vartheta \quad (1.1)$$

kde: Φ je tepelný tok [W]

λ – součinitel tepelné vodivosti [W * m⁻¹ * K⁻¹]

S – plocha, na níž k přestupu tepla dochází [m²]

ϑ – teplota [K]

Například pro ustálený stav vedení tepla rovinnou stěnou můžeme psát tento vztah:

$$\Phi = \frac{\lambda}{l} * S * (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (1.2)$$

kde: Φ je množství tepla předaného [W]

λ – součinitel tepelné vodivosti [W * m⁻¹ * K⁻¹]

l – tloušťka materiálu [m]

S – plocha, na níž k přestupu tepla dochází [m²]

ϑ_1, ϑ_2 – stálé teploty [K]

Pro neustálený stav platí základní rovnice Fourier – Kirchhofova:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\lambda}{c * \gamma} * \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) = a * \Delta \vartheta \quad (1.3)$$

kde: λ – součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} * \text{m}^{-1} * \text{K}^{-1}$]

c – měrná tepelná kapacita [$\text{J} * \text{kg}^{-1} * \text{K}^{-1}$]

γ – měrná hmotnost [$\text{kg} * \text{m}^{-3}$]

$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2}$ je Laplaceův diferenciální operátor teploty $\Delta \vartheta$

a – součinitel teplotní vodivosti daného materiálu [$\text{m}^2 * \text{s}^{-1}$]

- **Šíření tepla prouděním (konvekce)**

Šíření tepla prouděním je možné jen u kapalin a plynů a je možné pouze v látkách, kde se částice volně pohybují. Vždy se jedná o výměnu tepla mezi tekutinou a tuhým tělesem. Dochází k proudění látky o různé teplotě. U pevných látek šíření tepla prouděním nelze provést. K přenosu tepla dochází vzájemným pohybem jednotlivých částí hmoty s odlišnou teplotou a vnitřní hustotou. Při tomto procesu dochází jak k přenosu tepla, tak i k proudění média, které teplo také přenáší. Jedná se o jeden z nejobtížnějších výpočtových problémů. Základní rovnice je podle Newtonova vztahu:

$$\Phi = \alpha_k * S * \Delta \vartheta \quad (1.4)$$

kde: Φ je množství tepla předaného [W]

α_k – součinitel přestupu tepla konvekcí [$\text{W} * \text{m}^{-2} * \text{K}^{-1}$]

S – plocha, na níž k přestupu tepla dochází [m^2]

$\Delta \vartheta$ – střední teplotní spád [K]

Mezi teplotou povrchu a teplotou prostředí (i v ustáleném stavu) je vždy teplotní spád daný tenkou vrstvou prostředí, která lpí na povrchu stěny a proudění se neúčastní.

- **Šíření tepla sáláním (radiace)**

U tělesa vykazující teplotu vyšší než je absolutní nula, dochází k povrchovému vyzařování tepelné energie prostřednictvím elektromagnetického vlnění – tepelného záření. Prostředí pro toto vlnění musí být průzračné, aby se vlnění mohlo šířit přímočaře a všemi směry. Těleso je zahříváno, pokud přijme více zářivé energie, než samo vyzařuje svým

povrchem. U ochlazování platí přesný opak, tedy je-li převaha vyzařované energie nad přijatou. Není-li dán absolutně prázdný prostor, který je dokonalé průzračný pro procházející záření, pak každé jiné prostředí toto záření částečně pohltí. Při dopadu záření na jakékoliv těleso se energie z části pohltí, část se odrazí a část projde tělesem. Například pro zářivost šedého tělesa platí Stefan-Boltzmanův zákon.

$$E_{\text{s}} = \int_0^{\infty} E_{\lambda\text{s}} d\lambda = \int_0^{\infty} \varepsilon * E_{\lambda\text{c}} d\lambda = \varepsilon * \int_0^{\infty} E_{\lambda\text{c}} d\lambda = \varepsilon * E_{\text{c}} = \varepsilon * \sigma_{\text{c}} * \theta^4 \quad (1.5)$$

kde: E_{s} a E_{c} je úhrná zářivost šedého a černého povrchu

λ je vlnová délka [m]

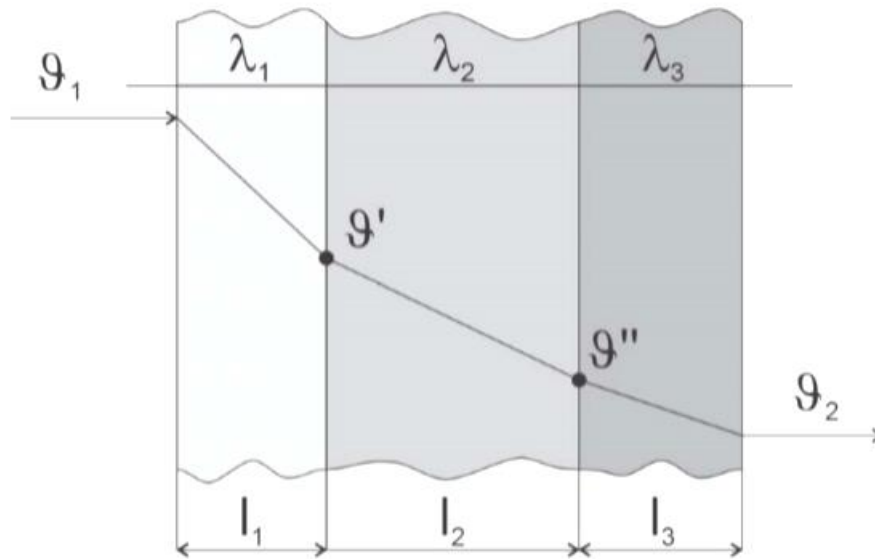
ε je poměrný součinitel sálání [-]

$\sigma_{\text{c}} = 5,67 * 10^{-8}$ je tzv. Stefan-Boltzmanova konstanta [$\text{W} * \text{m}^{-2} * \text{K}^{-4}$]

1.1.1 Ztráty tepla rovinnou stěnou

Tepelné ztráty v elektrotepelných odporových zařízeních vznikají především ztrátami stěnami pece a ztrátami akumulovaným teplem. V dané stěně se dále uvažují ztráty vysálaným teplem otvory. Jednotlivé vrstvy stěn oddělují dvě prostředí o různých teplotách, mezi nimiž vzniká výměna, tedy ztráta tepla jednoho prostředí ve prospěch druhého.

Pokud není stěna vyhřátá, dojde k částečnému pohlcení tepla stěnou tzv. akumulaci tepla a část tepla je odevzdána vnější stěnou do okolí jako ztráta stěnou. K akumulaci tepla nedojde, je-li stěna již vyhřátá. Potom je celková ztráta tepla dána pouze jako ztráta stěnou. Jedná se o stacionární stav. Jako názorný příklad je na obr. 1.1 stěna složená ze tří vrstev s různými tepelnými vodivostmi, tloušťkami a stejnou plochou S.



Obr. 1.1 Ztráty tepla rovinovou stěnou složenou z více vrstev (převzato z [1])

Pro ustálený stav můžeme podle obr. 1.1 psát výrazy pro tepelný tok:

$$1. \text{ stěna} \quad \Phi = \frac{\lambda_1}{l_1} * S * (\vartheta_1 - \vartheta') \Rightarrow \vartheta_1 - \vartheta' = \frac{\Phi * l_1}{\lambda_1 * S} \quad (1.6)$$

$$2. \text{ stěna} \quad \Phi = \frac{\lambda_2}{l_2} * S * (\vartheta' - \vartheta'') \Rightarrow \vartheta' - \vartheta'' = \frac{\Phi * l_2}{\lambda_2 * S} \quad (1.7)$$

$$3. \text{ stěna} \quad \Phi = \frac{\lambda_3}{l_3} * S * (\vartheta'' - \vartheta_2) \Rightarrow \vartheta'' - \vartheta_2 = \frac{\Phi * l_3}{\lambda_3 * S} \quad (1.8)$$

Výsledný tepelný tok Φ v ustáleném stavu pro uvažovanou vícevrstvou stěnu bude:

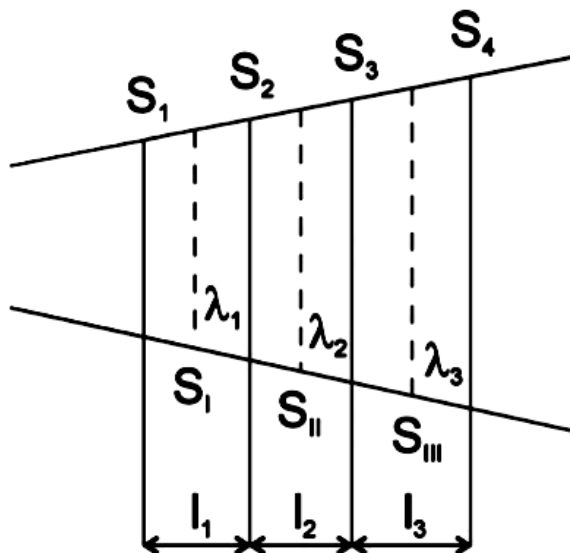
$$\Phi = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\frac{l_1}{\lambda_1 * S} + \frac{l_2}{\lambda_2 * S} + \frac{l_3}{\lambda_3 * S}} [W] \quad (1.9)$$

Je třeba brát v úvahu, že ve skutečnosti jsou plochy jednotlivých stěn u odporových pecí různé (čím blíže k vnitřní vrstvě, tím jsou menší) a je třeba vztah (1.8) poupravit.

$$\Phi = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\frac{l_1}{\lambda_1 * S_I} + \frac{l_2}{\lambda_2 * S_{II}} + \frac{l_3}{\lambda_3 * S_{III}}} [W] \quad (1.10)$$

kde plochy jednotlivých vrstev vidíme na obr. 1.2 a spočítáme je takto:

$$S_I = \sqrt{S_1 * S_2}; S_{II} = \sqrt{S_2 * S_3}; S_{III} = \sqrt{S_3 * S_4}; \quad (1.11)$$



Obr. 1.2 Ztráty tepla rovinnou stěnou složenou z více vrstev a různých ploch (převzato z [1])

1.1.2 Akumulované teplo

Při roztápní pece ze studeného stavu dosáhneme po určité době na pracovní teplotu, avšak stavební materiály nejsou ještě v žádném případě dostatečně prohřáté. Dokud nenastane tzv. setrvalý vztah, stěny akumulují teplo. Od počátku roztápní do dosažení ustáleného stavu nazýváme uplynulý čas, časem pro vytopení pece.

Dojde-li k vypnutí příkonu k peci, stěny vydávají akumulované teplo dovnitř pece i ven. Abychom ztrátu akumulovaným teplem snížili co nejvíce (neboť je ztrácíme při každém vytápní), musíme se především snažit, aby pec byla pečlivě uzavřena, aby žádný vzduch nevnikal nedovřenými dveřmi nebo jinými netěsnostmi do pece, a aby žádný vzduch neodcházel odtahy z pece. [7] Proto je velmi důležité použití vhodného tepelně izolačního materiálu na vyzdívku stěn.

1.2 Elektrotepelná odporová zařízení

V elektrotepelných odporových zařízeních dochází k přeměně elektrické energie na teplo přímo ve vsázce nebo v topných člácích. Teplo je předáváno do okolí a při tom

dochází k nárůstu teploty daného vodiče. Odporové teplo je úměrné druhé mocnině proudu a elektrickému odporu vodiče, což vyplývá z Joulova zákona. Podle něj můžeme určit množství tepla:

$$Q = R * \int_0^T i^2 dt \quad (1.12)$$

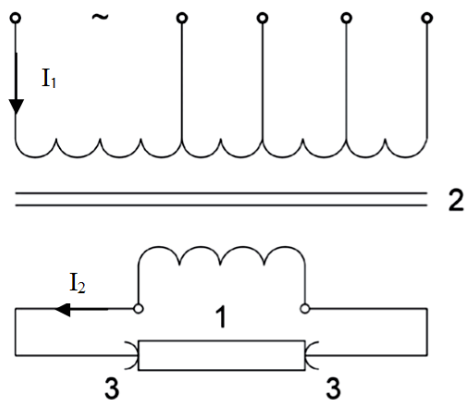
Tento vztah lze zjednodušit za předpokladu procházejícího konstantního proudu vodičem:

$$Q = R * I_{ef}^2 * T \quad (1.13)$$

Podle vzniku, působení a využití odporového tepla lze tato zařízení rozdělit do skupin s přímým a nepřímým ohřevem.

1.2.1 Přímý odporový ohřev

Princip zařízení sloužících pro přímý odporový ohřev je velmi jednoduchý. Dochází zde k přímému průchodu proudu elektricky vodivou vsázkou, nebo kapalinou (solné lázně), která je také elektricky vodivá a obklopuje vsázkou. Vsázka může být jak v pevném, tak i tekutém stavu. Pevná vsázka je ve formě kovů, uhlíku nebo grafitu. Kovová vsázka je tvarována do podoby dlouhých tyčí, drátů, pásů apod. Tekutá vsázka může být ve formě vody, roztaveného skla nebo elektrolytu. Příklad přímého odporového ohřevu lze ukázat na obr. 1.2.

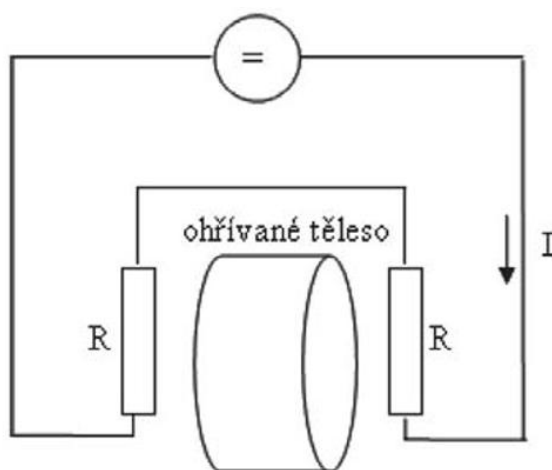


Obr. 1.3 Přímý odporový ohřev pevné vsázky (převzato z [3])

Obr. 1.1 ukazuje ohřev tyče I konstantního průřezu, do které je přiváděn přes kontakty 3 proud z regulačního transformátoru 2. Délka ohříváné tyče by měla být alespoň 10krát větší než její průměr, aby došlo k rovnoměrnému ohřevu po celé její délce. Tento způsob ohřevu je velice rychlý a účinný.

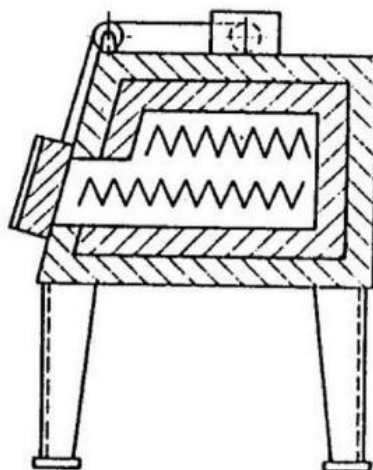
1.2.2 Nepřímý odporový ohřev

V zařízeních s nepřímým, odporovým ohřevem prochází proud topnými články umístěnými v pecním prostoru, jak je vidět na obr. 1.3, kde vzniká teplo. To se pak přenáší do vsázky sáláním topných článků, vyzdívky a prouděním atmosféry v pecním prostoru, popřípadě i vedením.



Obr. 1.4 Princip nepřímého odporového ohřevu (převzato z [2])

Typickým příkladem zařízení pro nepřímý odporový ohřev je komorová pec, která je vidět na obr. 1.4. Vsázka uvnitř pece se nepohybuje. Umístění topných článků je obvykle na bocích, někdy v podlaze, v zadní stěně, dveřích a na stropě. U větších pecí jsou dveře ovládané motorem.



Obr. 1.5 Komorová pec (převzato z [3])

Elektrická zařízení s nepřímým odporovým ohřevem lze rozdělit podle různých kritérií podle následující tabulky:

Podle teploty na pece:	Podle atmosféry v pecním prostoru na pece:
1.) nízkoteplotní do 600 °C	1.) s atmosférou normální (vzduch)
2.) středoteplotní od 600 °C do 1100 °C	2.) s atmosférou řízenou (nitridace, zamezení oxidace aj.)
3.) vysokoteplotní nad 1100 °C	3.) pracující s vakuem
Podle toho zda se vsázka při ohřevu pohybuje, nebo se nepohybuje, na pece:	
1.) se stabilní – nepohybující se vsázka s přerušovaným provozem	
2.) se vsázkou procházející pecí – pohybující se vsázka s nepřerušovaným provozem	
Podle použití v provozu na pece:	
1.) pro tepelné zpracování kovů	4.) pro chlazení skla
2.) pro tavení kovů	5.) pro laboratoře, pro domácnosti
3.) pro tavení skla	6.) s infračerveným ohřevem

Tab. 1.2 Rozdělení odporových pecí podle různých kritérií

1.3 Použití odporových pecí v průmyslu

Chceme-li, aby vsázka ve formě kovového materiálu nabyla určitých materiálových vlastností, jsou tyto objekty podrobeny tepelnému zpracování tzv. zušlechťování. Zejména ve strojírenství, kde jsou kladeny důrazy na zvýšenou hranici pevnosti, pružnosti a zachování tvaru tepelně zpracovaného materiálu. Pro správný postup jednotlivých procesů je velmi důležité dodržení dílčích průběhů teploty. V tomto směru je určitě výhodnější použití elektrické odporové pece před palivovou. Ve strojírenství se například pro ocelové součásti používají tyto základní procesy tepelného zpracování:

1. Žihání

Principem žihání oceli je zahřátí materiálu na teplotu 700 °C, setrvání při této teplotě přibližně dvě hodiny a poté dochází k pomalému chladnutí. Pro měkké žihání oceli bývá teplota vyšší. Tímto procesem se docílí snížení tvrdosti, zlepšení obrobitelnosti a snížení vnitřního pnutí.

2. Kalení

Při tomto procesu dojde k ohřátí ocelových součástí na tzv. kalící teplotu (např. 960 °C) a potom dojde k rychlému ochlazení ponořením do kalícího prostředí (voda, olej, roztavené solné lázně, roztavené kovové lázně, vzduch). Po kalení dochází ke zvýšení tvrdosti ocelových součástí.

3. Popouštění

Po zakalení jsou ocelové součásti sice tvrdé ale také křehké, proto jsou dále tepelně zpracovávány popouštěním, aby se docílilo vhodného kompromisu mezi křehkostí a tvrdostí. Součásti po zakalení se ohřívají na teplotu od 150 °C do 600 °C, poté pomalu chladnou a v důsledku toho se snižuje vnitřní pnutí.

4. Cementování

Cementování nebo cementace je označení pro proces, kdy dochází k nasycování povrchu ocelového předmětu uhlíkem při teplotě asi 900 °C. Dochází ke zlepšení tvrdosti povrchu ocelových částí a zachování houževnatosti jádra.

5. Nitridování

Při tomto procesu se pomocí dusíku v plynném nebo kapalném stavu zvyšuje odolnost povrchové vrstvy proti otěru při teplotách 470 °C až 580 °C.

6. Zušlechťování ocelových produktů

Jako poslední krok se používá zušlechťování ocelových výrobků, k docílení vysoké pevnosti a houževnatosti. Proces proběhne důkladným žiháním (při teplotě 800 °C až 860 °C), kalením a popouštěním (500 °C až 600 °C) při uvedených vyšších teplotách než při základním procesu.

1.4 Materiály pro elektrické pece

U návrhu a následné stavby elektrických pecí je důležité dodržovat použití specifických materiálů s vysokou tepelnou odolností pro jejich jednotlivé části. Jsou to:

a) *Žárupevné keramické materiály pro vnitřní vyzdívky*

Žárupevnost je parametr, který se zjistí za pomoci tzv. Segerova jehlanu o určitých rozměrech. Je-li materiál žárupevný, projeví se deformace hrotu jehlance v rozmezí teplot 1580 °C až 1770 °C. Materiály nad touto hranicí jsou vysoce žárupevné. Mezi tyto materiály můžeme zařadit dinas, šamoty, mulit, magnezit, chromitové výrobky a chrommagnezit. Tyto materiály musí být schopny unést mimo vlastní hmotnost například i hmotnost topných článků.

b) *Keramické materiály tepelně izolující*

Stěny pecí jsou tvořeny většinou dvěma nebo více vrstvami tepelně izolačních materiálů. Tyto materiály nemají tak vysokou mechanickou pevnost jako například vnitřní vyzdívky, ale mají nižší tepelnou vodivost, což je potřebné, aby nedocházelo k tak velkým tepelným ztrátám. Tato vrstva je tedy odlehčená od mechanického namáhání mimo vlastní hmotnost a není vystavena takovému žáru jako vrstva vnitřní. Mezi tyto materiály patří například lehčené šamoty, diatomit (výroba z křemeliny).

Požadovanými vlastnostmi pro izolační materiály jsou: malá tepelná vodivost, nízké měrné teplo, dostatečná žárupevnost, dostatečná mechanická pevnost (vlastní hmotnost), dostupnost a cena.

c) *Materiály pro vysoké teploty nesoucí topné články – elektricky izolující*

d) *Žárupevné kovové materiály*

Pro zhotovení kovových částí pecí, které namáhají vysoké teploty je nutnost použít speciální žárupevné materiály. Těmito částmi jsou myšleny například podlahové desky, kelímky pecí, tácy a poklopy pro drobné součásti, mufle, držáky topných článků, stěny pecí. Pro tyto materiály jsou důležité požadavky, které jsou uvedené v tab. 1.3 [3], [4].

Dostatečná odolnost v žáru	spolehlivost po dobu desítek tisíc hodin při pracovní teplotě
dostatečná mechanická pevnost a tuhost	nesmí docházet k deformaci součástí při mechanickém namáhání a při pracovní teplotě
dostatečná obrobiteľnosť	možnosť vyrábět jednotlivé díly mechanickým opracováním, svařováním, atd.

nízká cena a snadná dosažitelnost	obsahují drahé legující přísady (hlavně nikl a chróm)
-----------------------------------	-------------------------------------------------------

Tab. 1.3 Požadavky na žárupevné kovové materiály

- e) **Materiály pro topné články** jsou podrobněji popsány v kapitole 1.5

1.5 Topné články

V elektrických odporových pecích je topný článek významnou součástí zařízení, sloužící jako zdroj k přenosu tepla do prostoru pece. Při nižších teplotách, přibližně do tři sta stupňů Celsia, se šíří teplo především prouděním. Při teplotách vyšších nad tři sta stupňů Celsia hlavně sáláním. Články jsou konstruovány tak, aby splňovaly náročné požadavky, mezi které patří:

- a) **žárupevnost topného článku při pracovní teplotě**
b) **mechanická pevnost při vysoké teplotě:** Alespoň takovou, aby například spirály ve svislé poloze byly schopny udržet svou vlastní hmotnost.
c) **velký měrný odpor:** Pro možnost připojení topného článku přímo na síť bez použití transformátoru. Zvyšováním měrného odporu topného materiálu se zvětší jeho průřez a zmenší délka, což je žádoucí.

$$\rho = R * \frac{S}{l} ; R = \rho * \frac{l}{S} \quad (1.14)$$

kde: ρ – měrný odpor [$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$]

S – průřez topného materiálu [mm^2]

R – rezistivita topného materiálu [Ω]

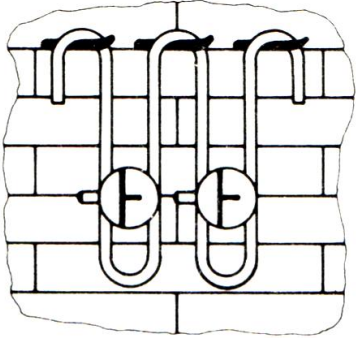
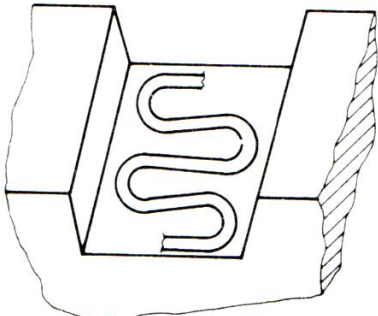
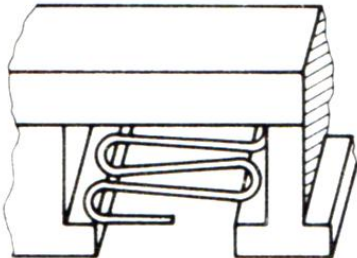
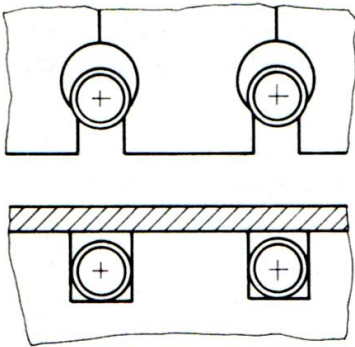
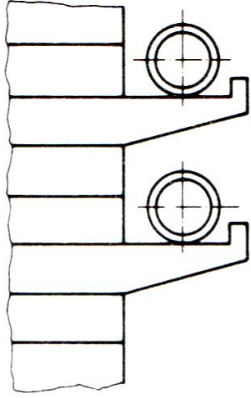
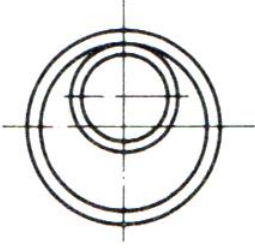
l – délka topného materiálu [m]

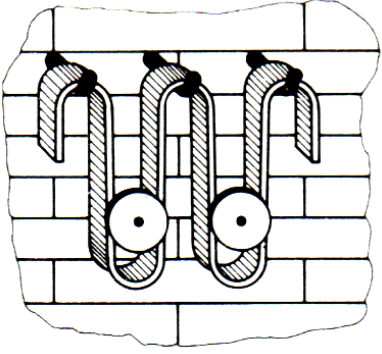
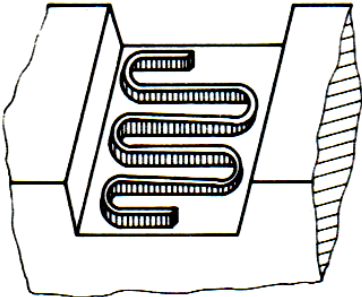
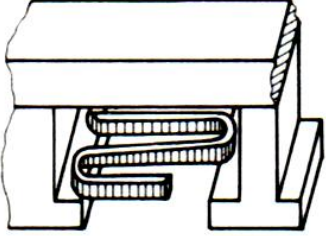
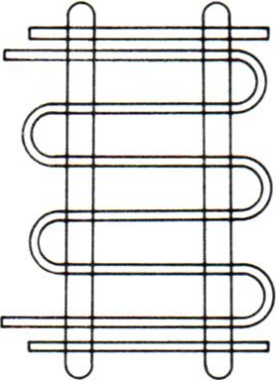
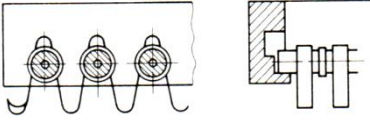
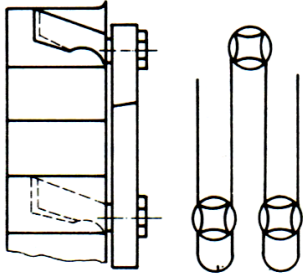
- d) **malý teplotní součinitel odporu:** Sloužící k zajištění malého rozdílu odporu článku zatepla a zastudena.
e) **stálost měrného odporu:** Vlivem stárnutí materiálu dochází ke zvyšování odporu a tím ke zmenšení odebíraného příkonu a poklesu teploty v peci. Souvisí s nároky na udržení stálosti rezistivity po dobu životnosti článku.
f) **malá tepelná roztažnost:** Nutnost při konstrukci uvažovat prodlužování článků vlivem tohoto parametru.
g) **Dobrá zpracovatelnost do různých tvarů:** Možnost vytvarování do spirál a vlnitých

pásů.

h) odolnost proti chemickým vlivům atmosféry v pecích a keramiky, se kterou přicházejí v peci do styku

Konstrukčně lze topný článek sestavit jako otevřený nebo uzavřený a příklady jejich provedení lze vidět v tab. 1.4.

Provedení a uložení topných článků drátových		
Zavěšení na kovových háčích ve tvaru meandru	Umístění v podlaze	Umístění ve stropu
		
Uložení ve stropních a podlahových tvárnících ve tvaru spirály	Umístění na prodloužených nosných tvárnících	Umístění na keramické trubce
		

Provedení a uložení topných článků pásových		
Zavěšení na kovových háčích ve tvaru meandru	Umístění v podlaze	Umístění ve stropu
		
Vyměnitelný rámový článek	Umístění na keramických trubkách	Meandr na keramických vyjímatelných nosičích
		

Tab. 1.4 Další možnosti provedení a uložení topných článků

Materiály pro topné články dělíme do dvou skupin a to materiály kovové a nekovové.

1.5.1 Kovové materiály

Mezi kovové materiály patří slitiny Ni, Cr, Fe, Al nemagnetické a magnetické, čisté kovy, ocel a speciální slitiny. [6]

- **Austenitické slitiny** – Jsou nemagnetické, tzv. chromniklové. Pro topné články se využívá podvojná slitina Ni + Cr a potrojná slitina Ni + Cr + Fe. Tyto slitiny jsou nejjakostnější, mají dobrou žárupevnost, odolávají častým zapnutím a vypnutím. Mají dobrou svařitelnost, tvarovatelnost, vysokou rezistivitu, malý teplotní činitel odporu, nestárnou a jsou stálé. [5]

- **Feritické slitiny** – Feritické slitiny jsou magnetické slitiny Cr+Al+Fe bez niklu, vysoce žárupevné s větší rezistivitou než skupina předešlá. Patří sem slitiny s obchodními názvy: Kanthal, Alsichrom, Alkrothal, Chromal, Aluchrom, Thermal aj. Rezistivity drátů z těchto slitin jsou kolem $1,4 \mu\Omega \cdot m$ při $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a mění se s teplotou velmi málo. Tyto materiály jsou pro pracovní teploty až do $1375 \text{ }^\circ\text{C}$. [6]

- **Čisté kovy** – Mezi tyto kovy patří: platina, wolfram a molybden. Využití těchto kovů je v laboratorních nebo u jiných speciálních pecí, kde jsou značné nároky na vysokou teplotu.[5]

- **Ocel a speciální odporové slitiny** – Jako první lze uvést ocelový drát, který lze použít až do teploty 900°C , ve vodíkové atmosféře. V normálním ovzduší lze ocelový drát použít pouze do teploty $400 \text{ }^\circ\text{C}$, vzhledem k značné závislosti odporu na teplotě. Výhodou je jeho levnost. Druhou variantou jsou speciální slitiny Konstantan ($56\% \text{ Cu} + 44\% \text{ Ni}$) a Nikelin ($65\% \text{ Cu} + 34\% \text{ Ni} + 1\% \text{ Fe}$), jejichž odpor se s teplotou téměř nemění. [5]

1.5.2 Nekovové materiály

Z důvodu možnosti pracovat při normální atmosféře o teplotách vyšších než je maximální teplota kovových materiálů $1375 \text{ }^\circ\text{C}$ a zachování základních vlastností, se hledaly vyhovující nekovové materiály. Těmto požadavkům odpovídají:

- **Karbid křemíku (SiC)** – Karbid křemíku je nejčastěji používaný nekovový materiál pro topné články s obchodními názvy Silít, Global, Crusilir, Cesiwid aj. Rezistivita je značně vyšší než u kovových materiálů ($0,6\text{--}3,0 \text{ m}\Omega \cdot m$), což umožňuje topné články zhotovovat např. ve tvaru tyčí se zesílenými konci. Průměry tyčí jsou $1,2$ až 5 cm , délky od 8 do 200 cm . Použitelnost topných SiC článků je až do teploty $1500 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplotní součinitel odporu je asi do $800 \text{ }^\circ\text{C}$ záporný, nad $800 \text{ }^\circ\text{C}$ kladný. Doba životnosti topných článků je od 3000 do 10000 pracovních hodin. [6] Teplota tavení SiO_2 je $1726 \text{ }^\circ\text{C}$.

- **Cermetové články** - Jsou vyráběny práškovou metalurgií. Základním materiálem je směs molybdenitu křemičitanů (MoSiO_2) s oxidem křemičitým (SiO_2). Články jsou nejčastěji ve tvaru U (vlásenky). Mohou být také ve tvaru tyčí, trubek. Pracovní teploty článků jsou $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ až $1700 \text{ }^\circ\text{C}$. Žárupevnost způsobuje ochranná vrstva SiO_2 vznikající na povrchu článku za provozu. Cermetové články jsou křehké, nesnášejí otřesy. Jsou odolné proti atmosféře oxidační, dusíkové, argonové a z CO. Škodí jim síra a chlor.

Rezistivita se mění značně s teplotou (při 20 °C je $\rho=0,25 \mu\Omega\cdot\text{m}$, při 1600 °C je $\rho = 3,5 \mu\Omega\cdot\text{m}$), proto se připojují přes regulační transformátory. [6] Teplota tavení křemíku je přibližně 1410 °C.

- **Uhlíkové a grafitové topné články** – Topné články se vyrábějí ve tvaru tyčí, trubek aj. Pracovní teploty jsou až do 2000 °C ve vakuu nebo řízené atmosféře, zabráňující oxidaci. Při normální atmosféře nastává oxidace u uhlíkových článků zhruba od 400 °C, u grafitových zhruba od 600 °C. Rezistivita uhlíku s rostoucí teplotou klesá. U grafitu ze 100 % při 0 °C s rostoucí teplotou rezistivita nejprve klesá, při teplotě kolem 400 °C je asi 77 % a potom opět roste. Při 1400 °C je rezistivita asi 96 % původní hodnoty. [6]

1.6 Senzory, regulace teploty a zapojení elektrických odporových pecí

Úkolem senzorů a regulace teploty v odporových pecích je přesné udržování pracovní teploty nebo vyvolání patřičných teplotních změn například při roztápní pece nebo jejím odstavení. Mezi nejstarší a nejjednodušší způsoby regulace řadíme klasické připínání a odpínání celého příkonu pece podle toho, zda je konkrétní teplota vyšší nebo nižší než požadovaná pracovní teplota.

1.6.1 Tepelné senzory

Teplota je termodynamická stavová veličina definovaná na základě účinnosti vratného Carnotova cyklu. Účinnost vratných Carnotových cyklů pracujících mezi stejnými lázněmi určitých teplot je závislá na těchto teplotách a nezávisí na použité teploměrné látce. Platí vztah. [8]

$$\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad (1.15)$$

kde: η – účinnost [%]

Q_2 – je odebrané teplo teploměrnou látkou z lázně s teplotou T_2

Q_1 – je odevzdané teplo teploměrnou látkou do lázně s teplotou T_1 , přičemž platí
. $T_2 > T_1$

Ze vztahu 1.15 vyplývá, že poměr dvou termodynamických teplot je rovný poměru tepla odevzdaného chladiči a tepla přijatého od ohříváče při vratném Carnotově cyklu

pracujícím mezi těmito teplotami.

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (1.16)$$

Tepelné senzory lze rozdělit do následujících skupin podle tabulky 1.5:

SENZORY PRO DOTYKOVÉ MĚŘENÍ					SENZORY PRO BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ
Elektrické					Tepelné
odporové kovové	odporové polovodičové	polovodičové s PN přechodem	termoelektrické	krystalové	
Dilatační					
kapalinové	plynové	Parní	bimetalové		Kvantové
Speciální					
akustické	šumové	Magnetické	tekuté krystaly	teploměrné barvy aj.	

Tab. 1.5 Rozdělení tepelných senzorů

U pecí v průmyslu se nejčastěji vyskytují elektrické senzory teploty, kde se ve snímači převede teplota na elektrickou veličinu (napětí, odpor) a ta se následně vyhodnotí elektrickým obvodem a převede na teplotní údaj. V elektrotepelných zařízeních jsou nejčastěji využívány elektrické senzory odporové kovové a termoelektrické. Proto dále zmíním podrobněji právě tyto.

- **Odporové kovové senzory teploty**

Principem odporových kovových teploměrů je teplotní závislost odporu kovu na teplotě. Kov si lze představit jako soubor kladných iontů umístěných v mřížkových bodech krystalové mřížky a tzv. elektronového plynu tvořeného souborem chaoticky se pohybujících elektronů. Pro konduktivitu kovů platí: [8]

$$\sigma = n * e^2 * \frac{\tau}{m} \quad (1.17)$$

kde: σ je konduktivita

n – počet elektronů v jednotkovém objemu

e – elementární náboj

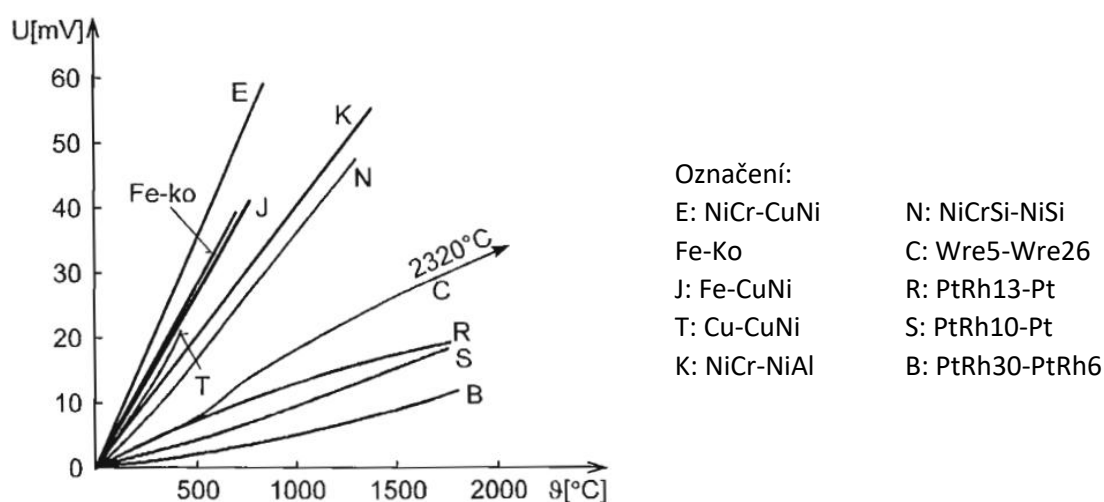
τ – hmotnost nosiče náboje

m – hmotnost nosiče náboje

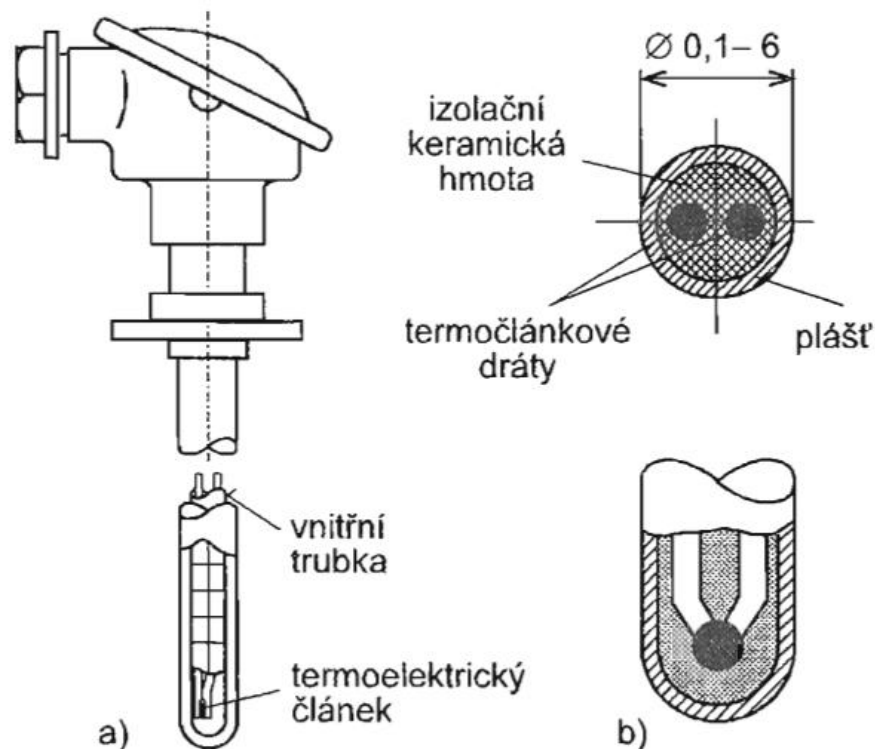
Pro malé provozní teploty (0 °C – 100 °C) lze použít kovové teploměry s poměrně jednoduchým vztahem, avšak pro vyšší rozsahy teplot je zapotřebí uvažovat nelineární rovnice v závislosti na použitém kovu. Platinové teploměry patří mezi nejrozšířenější. Dalším často využívaným materiálem je nikl, měď, molybden a pro extrémně nízké teploty od 0,5 K slitiny Rh-Fe, Pt-Co aj.

- **Termoelektrické senzory teploty**

Měření teplot za pomoci termočlánku je jednou z nejrozšířenějších metod. Termočlánky jsou používány hlavně pro svoji jednoduchost, široký rozsah teplot a tepelnou odolnost. Funkce termočlánků je založena na Seebeckovu jevu, tj. na jevu převodu tepelné energie na elektrickou. V uzavřeném obvodu realizovaném ze dvou materiálově různých vodičů nebo polovodičů protéká elektrický proud tehdy, pokud mají oba spoje A, B rozdílnou teplotu $T = T_A - T_B$. Jestliže uvedený obvod kdekoliv rozpojíme, bude na vzniklých svorkách elektrické napětí.[8] Na obr. 1.6 lze vidět závislosti napětí na teplotě u různých druhů termočlánků a na obr. 1.7 příklad konstrukčního uspořádání termočlánků.



Obr. 1.6 Statické charakteristiky vybraných typů termoelektrických článků (převzato z [6])



Obr. 1.7 Příklad konstrukčního uspořádání termočláňků (převzato z [8])

(a – tyčový termoelektrický teploměr, b – plášťový termoelektrický článek s izolovaným měřícím spojem)

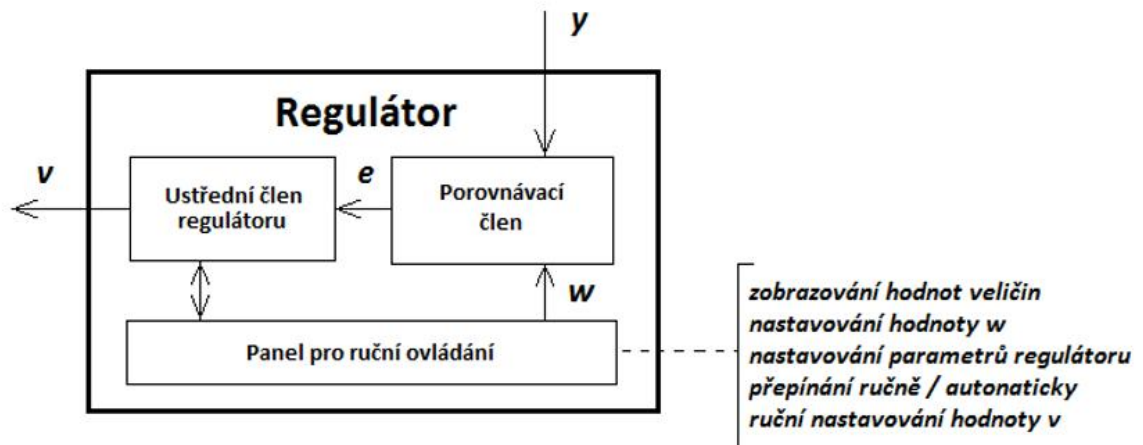
1.6.2 Regulační systémy

Základním prvkem automatického řízení u technologických procesů je regulace. Technologický proces musí probíhat za jistých pravidel a podmínek a toho se dá docílit za pomoci speciálních obvodů spojených s technologickým zařízením. Regulací elektrických odporových pecí tedy rozumíme udržování určité požadované teploty v pracovním prostoru pece (regulovaná soustava) či její zvyšování nebo snižování. Technickým prostředkem pro tuto činnost je regulátor, který společně s regulovanou soustavou, měřícími a ovládacími prvky tvoří regulační obvod.

Regulátorů dnes existuje celá řada, avšak můžeme je rozdělit na dvě hlavní skupiny podle průběhu zpracovávané veličiny na regulátory spojitě a nespojitě:

- **Spojité regulátory**

U spojitých regulátorů se mění regulovaná veličina spojitě v čase. Dochází tedy k reakci na velmi malé změny regulační odchylky a v důsledku toho lze dosáhnout velké jakosti regulace. Tyto regulátory jsou citlivé na přenosové vlastnosti v závislosti na frekvenci a lze je určit z frekvenční charakteristiky, pomocí které se nastavuje vhodná regulace. Na obrázku 1.6 lze vidět obecné blokové schéma regulátoru.



Obr. 1.8 Funkční schéma regulátoru (převzato z [9])

kde: y – naměřená hodnota
 w – hodnota řídicí veličiny
 e – regulační odchylka
 v – akční zásah

Porovnávací člen určuje hodnotu odchylky regulační odchylky e odečtením měřené hodnoty regulované veličiny od hodnoty řídicí veličiny podle vztahu 1. 18 [9]

$$e = w - y \quad (1.18)$$

Hodnota w je nastavována ručně, na ovládacím panelu nebo dálkově standardním signálem. Regulační odchylku vypočtenou podle (1.18) zpracovává **ústřední člen** regulátoru a výsledkem je **akční zásah**, tedy signál ovládající akční člen. Funkce ústředního členu mohou být různé podle požadavků na kvalitu regulace. Z matematického hlediska je obecný tvar rovnice popisující chování (tj. časový průběh výstupu v) běžně užívaného spojitě pracujícího ústředního členu následující: [9]

$$v = r_0 * e(t) + r_{-1} \int_0^t e(\tau) * dt + r_1 \frac{de(t)}{dt} \quad (1.19)$$

P I D

Z rovnice je patrné, že ústřední člen je tvořen třemi částmi P, I, D, které jsou definovány takto:

Proporcionální složka P – r_0 je proporcionální konstanta (zesílení) regulátoru, která určuje reakci regulátoru na velikost regulační odchylky

Integrační složka I – r_{-1} je integrační konstanta regulátoru určující reakci regulátoru na dobu trvání regulační odchylky

Derivační složka D – r_1 je derivační konstanta regulátoru, která určuje reakci regulátoru na rychlost změny hodnoty regulační odchylky.

Výše uvedené tři základní vlastnosti ústředního členu se v reálných regulačních obvodech kombinují tak, aby regulace fungovala co nejlépe. Výsledné regulátory se pak označují příslušnou kombinací písmen P, I a D. V praxi se používají tyto typy regulátorů: P, PI, PD a PID. [9]

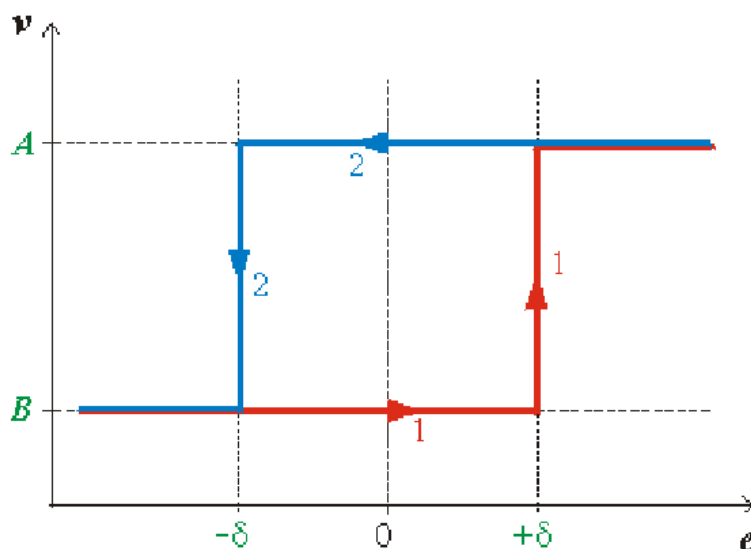
- **Nespojité regulátory**

U těchto regulátorů se akční veličina nemění spojitě, ale nabývá omezeného počtu hodnot. V určitých časových okamžicích se výstupní veličina mění skokově a zůstává nezměněná až do doby dalšího zásahu regulačního obvodu. Pro moderní regulační systémy jsou typické právě nespojité regulace z důvodu digitalizace. Vzhledem k velkému množství vzorkovaných signálů se tyto regulace na první pohled mohou jevit jako spojitě, což je velkou výhodou u dnešních systémů. Tyto regulátory jsou dnes velmi rozšířené hlavně díky malým rozměrům a jednoduché konstrukci. Jedinou nevýhodou je omezená jakost regulace právě podle množství vzorkovacích signálů.

Dvoupolohová regulace – Dvoupolohový regulátor se od spojitěho liší tím, že neovládá akční člen spojitě, ale pouze jej přestavuje do jedné ze dvou mezních poloh (např. otevřeno – zavřeno, zapnuto – vypnuto). Tohoto způsobu regulace se používá všude tam,

kde nejsou kladeny vysoké nároky na přesnost, často se s ním setkáme např. u domácích spotřebičů. Jeho předností je, že je jednoduchý a levný.

Dvoupolohový regulátor musí být vybaven definovanou necitlivostí na změnu regulované veličiny v rozmezí $\pm\delta$ kolem žádané hodnoty. Je to nutné proto, aby konkrétní akční člen (např. stykač) nekmital příliš rychle a nezničil se, a také aby se časté rázy nepřenesly do celého regulovaného systému a nezatěžovaly jej. Schematicky je princip práce s necitlivostí naznačen na obr. 1.9. Pracovní polohy akčního členu jsou označeny obecně A a B . Při růstu regulační odchylky e se akční veličina v mění podle čáry 1, při jejím poklesu podle čáry 2. Je vidět, že v rozmezí $\pm\delta$ kolem bodu $e = 0$ regulátor nereaguje a zachovává předchozí hodnotu akční veličiny. [9]



Obr. 1.9 Funkční schéma regulátoru (převzato z [9])

S postupem času a rozvojem nové technologie došlo k velkému rozvoji regulátorů. Analogové regulátory pracující spojitě přešly k regulátorům číslicovým, tedy nespojitým. Důvodem je častější využívání výpočtové techniky pro řízené procesy. S tím je spjata i nutnost převádět analogový signál na číslicový. Ačkoliv pracuje většina dnešních regulátorů nespojitě, díky velmi krátkým časovým intervalům mezi regulačními zásahy se jeví jako regulátory spojitě. Dnes se běžně využívá pro průmyslovou praxi regulace nespojitá: dvoupolohová nebo regulace na principu proporcionálně integrační.

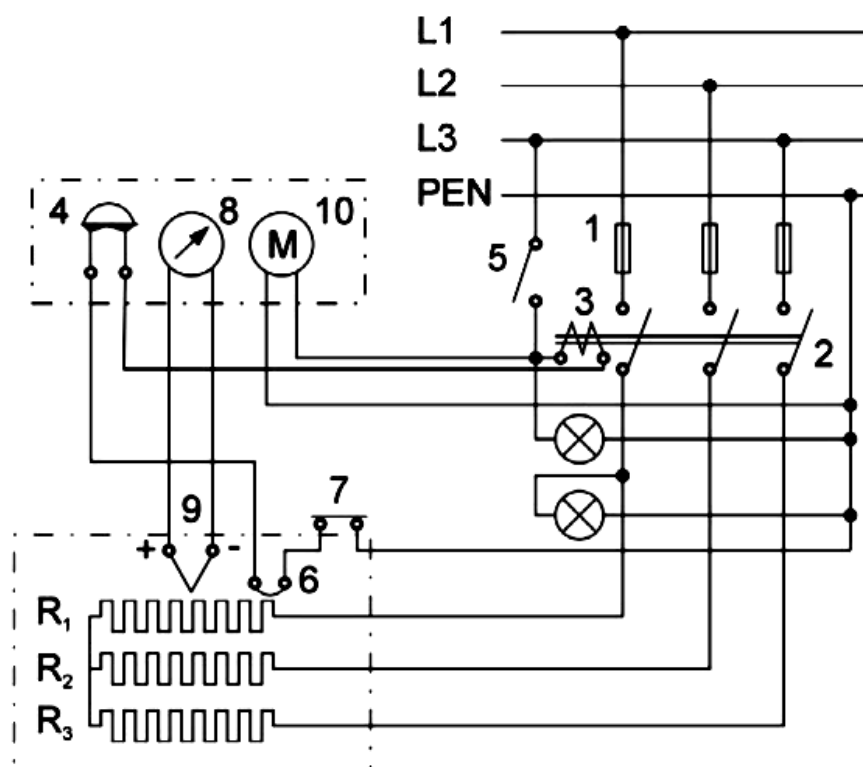
Další rozdělení regulátorů lze vidět v tabulce 1.6

Podle způsobu popisu	Lineární – popsány lineárními rovnicemi	
	Nelineární – popsány nelineárními rovnicemi	
Podle přívodu energie	Přímé – Nepotřebují vnitřní zdroj, energie pro vlastní činnost je získána v řízené soustavě	
	Nepřímé – Potřebují pro svoji činnost vnější zdroj energie	
Podle druhu zpracovaného signálu	Elektrické	Hydraulické
	Pneumatické	A jiné ...

Tab. 1.6 Další možnosti rozdělení regulátorů

1.6.3 Zapojení pecí

V dnešní době se běžně používá pro připojení příkonu u elektrických odporových pecí řešení zapojením polovodičových prvků v přívodu k peci. Běžný způsob elektrického schéma zapojení odporové pece můžeme vidět na obr. 1.10.



Obr. 1.10 schéma zapojení elektrické odporové pece (převzato z [2])

Na obr. 1.10 odpory R_1 , R_2 , R_3 , značí odporová vinutí pece, připojená na jednotlivé fáze. Pec je připojena k 3fázové síti s vyvedeným nulovým vodičem přes stykač 2. Před stykačem jsou v sérii zařazeny pojistky 1. Pec se připíná k síti vypínačem 5. Po sepnutí vypínače dojde k uzavření pomocného obvodu složeného z: cívky stykače 3, rtuťového spínače automatického regulátoru teploty 4, pojistkového topného drátku v peci 6 a dveřního kontaktu 7. Rozsvícení červeného světla signalizuje chod pece. Současně dochází ke startu pohonu automatického regulátoru teploty 10. Po nabuzení spínací cívky 3 se sepne stykač 2 a připojí topné články k síti. Přístroji ukazující teplotu v peci je dodáváno napětí termočlánkem 9.

1.7 Muflová pec

Elektrická odporová muflová pec je elektrotepelné zařízení, které slouží k tepelnému zpracování vložené vsázky nebo k jejímu ohřevu. K přeměně elektrické energie na tepelnou dochází v topném článku, který může být ve tvaru spirály s kruhovým průřezem vodiče, anebo ve formě vlnitých pásů s obdélníkovým průřezem. Pec je konstruována na periodický způsob provozu, to znamená, že vsázka je do pece uzavřena a po skončení procesu je vyjmuta ven. U těchto typů pecí se nepoužívají rošty v pracovním prostoru. Vsázka je tedy umísťována přímo na dno uvnitř mufle. Samotná mufle je tvořena ze žárupevného materiálu ve tvaru kvádru. Atmosféra pece a topného systému je tak oddělena právě tímto prvkem. Osvědčenou koncepcí je umístit topné články do čtyř stěn pro zaručení homogenity teplotního pole v pracovním prostoru. V dnešní době mají muflové pece uplatnění v mnoha odvětvích jako je např.:

- ***strojírenství***

V tomto odvětví mají muflové pece své uplatnění hlavně pro tepelné zušlechťování menších částí.

- ***technická a umělecká keramika***

Keramické výrobky jsou široce používány v různých odvětvích. Pro testování kvality a chování keramického výrobku jsou vyžadovány velmi vysoké teploty a extrémní pracovní podmínky. Muflové pece pomáhají výrobcům v keramickém průmyslu dosáhnout takovýchto teplot k snadnému a efektivnímu měření kvality keramických vzorků.

- **metalurgie** - pro testování materiálových vzorků

- **sklářský průmysl**

Ve sklářském průmyslu se provádí několik úkolů, které vyžadují vysokou teplotu pro stanovení vlastností surovin pro výrobu vysoce kvalitního výrobku. Mezi tyto úkoly patří tavení skla v době recyklace, vyfukování skla, aby se vytvořil jiný tvar výrobků atd. Navíc jsou také použity k tomu, aby bylo sklo pevnější a více pružné. Teplota, která je požadována pro pevné skleněné výrobky, je 700 až 900 stupňů Celsia. Těchto teplot lze snadno dosáhnout pomocí muflových pecí.

- **malířský průmysl**

Výrobci v nátěrovém průmyslu využívají muflové pece k rychlému sušení barev, smaltu a povlaků, které vyžadují velmi vysokou teplotu. Díky vysokým teplotám lze barvy snadno sušit. Tento postup pomáhá k rychlému měření pro různé typy zkoušek odolností a trvanlivosti různých nátěrů a barev.

- **plastový průmysl**

V plastovém průmyslu jsou muflové pece využity hlavně pro provedení zkoušky termochemického spalování a vypočítání obsahu popela v plastových materiálech. Z obsahu popela v plastickém materiálu se zjistí chemické složení a fyzikální struktura produktu. Je to nejlepší způsob, jak určit kvalitu výrobků.

- **kovolitectví a šperkařství** - tavení drobných kovových materiálů

- **zdravotnictví** - stomatologické laboratoře

- **chemické laboratoře** - vysoušení chemikálií

- **zemědělské a potravinářské laboratoře** - především pro spalovací procesy

2 Návrh elektrické odporové muflové pece

Cílem tohoto bodu je návrh konstrukčního provedení, tepelný a elektrický výpočet elektrické odporové muflové pece se zadanými parametry, které jsou uvedeny v tab. 2.1 :

Pracovní teplota	900 [°C]	
Rychlost ohřevu	150 – 200 [°C/hod]	
Vnitřní rozměry mufle	průměr	1 [m]
	Výška	2 [m]

Tab. 2.1 Původně zadané parametry pro muflovou pec

Po konzultacích s prof. Ing. Jiřím Koženým CSc. a ing. Jiřím Lucákem, jsme se rozhodly poupravit zadání, co se týče rozměrů pece a byla zvolena vsázka pro ohřev, kterou je konstrukční ocel. Rozměry jsou uvedeny v tab. 2.2.

Pracovní teplota	900 [°C]	
Rychlost ohřevu	150 – 200 [°C/hod]	
Vnitřní rozměry pracovního prostoru pece	Šířka (a)	180 [mm]
	Výška (b)	120 [mm]
	Délka (c)	400 [mm]
Vnější rozměry pece	Šířka (a)	520 [mm]
	Výška (b)	722 [mm]
	Délka (c)	830 [mm]
Rozměry vsázky (konstrukční ocel)	Šířka (a)	200 [mm]
	Výška (b)	40 [mm]
	Délka (c)	100 [mm]

Tab. 2.2 Upravené parametry pro muflovou pec a vsázku

Podle pracovní teploty je zřejmé, že tato pec se řadí mezi pece středoteplotní, jak je uvedeno v tab. 1.2. Pro výpočty budu uvažovat ohřev vsázky ve tvaru kvádru, kterou je konstrukční ocel s rozměry $a * b * c = 0,2 * 0,04 * 0,1$ m.

Teploty vsázky: počáteční $\vartheta_{vs,0} = \vartheta_{ok} = 20$ °C
konečná ohřevu $\vartheta_{vs,k} = 900$ °C

Vlastnosti vsázky:	měrná hmotnost	$\rho_{vs} = 7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	měrné teplo	$c_{vs} = 0,68 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
	tepelná vodivost	$\lambda_{vs} = 34,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
	stupeň černosti	$\varepsilon_{vs} = 0,82$

Pec bude pracovat periodickým způsobem. To znamená, že po vložení zadané vsázky se pec uzavře, dojde k tepelnému procesu a poté se vsázka vyjme. Pracovní prostor bude zaplněný vzduchem.

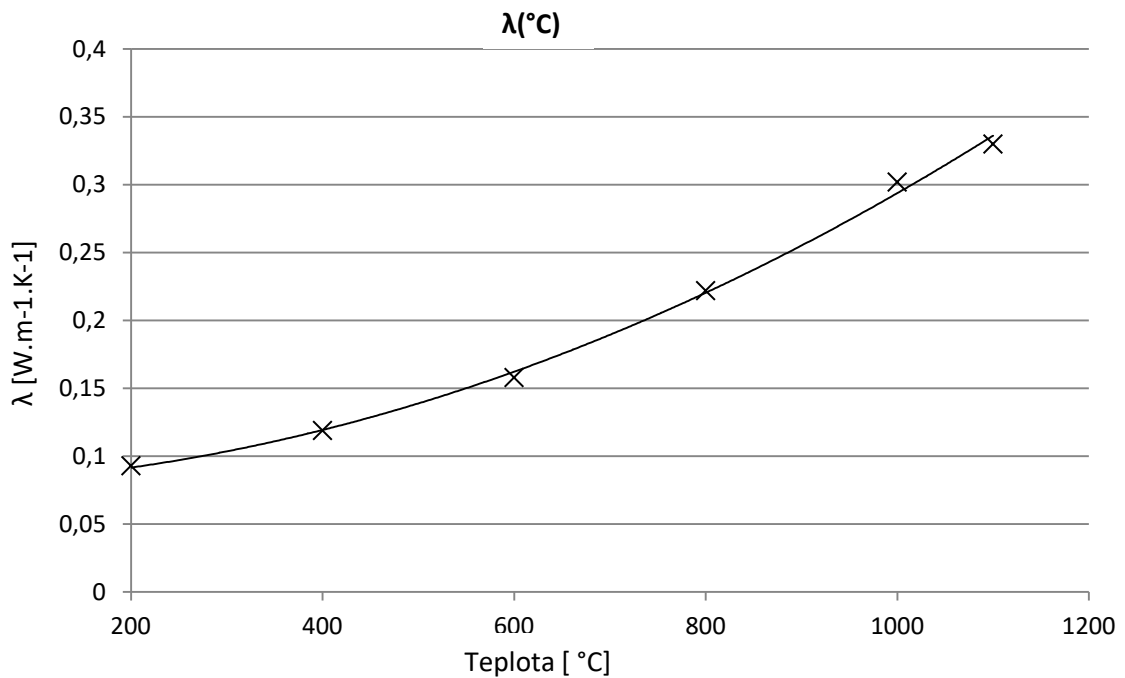
2.1 Konstrukční provedení

Pro navrhovanou pec budu uvažovat materiály, které jsou typické pro tato zařízení. Vnitřek pece navrhne z dvojvrstvé vyzdívky. Samotná mufla je tvořena z materiálu karbidu křemíku (SiC) s navinutým topným článkem z odporového materiálu KANTHAL A1. Tepelná izolace bude tvořena vláknitým materiálem, kterým je keramická deska typu Sibral STANDART 300. Vnější plášť konstrukce zvolím ocelový. Ohřívanou vsázkou je konstrukční legovaná ocel. Materiálové vlastnosti jsou v tab. 2.3.

Vlastnosti	Karbid křemíku	Sibral	Konstrukční legovaná ocel
měrná hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	3100	300	7800
měrné teplo [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	1800	969	680
tepelná vodivost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	60	$\lambda(^{\circ}\text{C})$	34,9

Tab. 2.3 Fyzikální vlastnosti pro použité materiály

Tepelná vodivost materiálu Sibral standart 300 je značně závislá na teplotě. Tato závislost je zobrazena v grafu 2.1



Graf. 2.1 Závislost součinitele tepelné vodivosti desky Sibral standart 300 na teplotě

2.1.1 Výpočet hmotnosti pece

Odpovídající vnitřní povrch pracovní komory je ve tvaru kvádra a můžeme jej spočítat podle zadaných údajů z tab. 2.2:

$$\begin{aligned}
 A_{vni} &= 2 * (a * b + b * c + c * a) \\
 &= 2 * (0,18 * 0,12 + 0,12 * 0,4 + 0,4 * 0,18) = 0,2832 \text{ m}^2 \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

Odpovídající vnější povrch pece je také ve tvaru kvádra a můžeme jej spočítat:

$$\begin{aligned}
 A_{vně} &= 2 * (a * b + b * c + c * a) \\
 &= 2 * (0,52 * 0,722 + 0,722 * 0,83 + 0,83 * 0,52) \\
 &= 2,8126 \text{ m}^2 \quad (2.2)
 \end{aligned}$$

Pro návrh vyzdívky z materiálu SiC a Sibralu s ohledem na zadanou teplotu pece, vlastnosti a především zadané rozměry pece je třeba zvolit jejich šířky různé, jak je znázorněno v tabulce 2.4.

Materiál	rozložení v ose peci	Tloušťka / (přední a zadní stěna) [m]		Tloušťka / (2 boční stěny) [m]		Tloušťka / (spodní a horní stěna) [m]	
Karbid křemíku	horizontální	$l_1 = 0,035$	$l_1 = 0,035$	$l_1 = 0,035$	$l_1 = 0,035$	$l_1 = 0,035$	$l_1 = 0,035$
	Vertikální	$l_1 = 0,035$	$l_1 = 0,035$	$l_1 = 0,035$	$l_1 = 0,035$	$l_1 = 0,035$	$l_1 = 0,035$
Sibral STANDART 300	horizontální	$l_2 = 0,133$	$l_2 = 0,133$	$l_{22} = 0,178$	$l_{22} = 0,178$	$l_2 = 0,133$	$l_2 = 0,133$
	Vertikální	$l_{21} = 0,264$	$l_{21} = 0,264$	$l_{21} = 0,264$	$l_{21} = 0,264$	$l_{22} = 0,178$	$l_{22} = 0,178$
Ocelový plášť	horizontální	$l_3 = 0,002$	$l_3 = 0,002$	$l_3 = 0,002$	$l_3 = 0,002$	$l_3 = 0,002$	$l_3 = 0,002$
	Vertikální	$l_3 = 0,002$	$l_3 = 0,002$	$l_3 = 0,002$	$l_3 = 0,002$	$l_3 = 0,002$	$l_3 = 0,002$

Tab. 2.4 Tloušťky vrstev l uvažovaných materiálů v jednotlivých rovinách

Odpovídající povrchy mezi dílčími vrstvami lze spočítat pomocí obsahu ploch, přičemž jsou vždy dvě protilehlé stejné:

a) Povrch mezi mufli z karbidu křemíku a Sibralem:

I. Přední a zadní stěna

$$S_{11} = 2 * (a * b) = 2 * (0,035 + 0,18 + 0,035) * (0,035 + 0,12 + 0,035) = 0,095 \text{ m}^2 \quad (2.3)$$

II. Boční stěny

$$S_{12} = 2 * (a * b) = 2 * (0,035 + 0,4 + 0,035) * (0,035 + 0,12 + 0,035) = 0,1786 \text{ m}^2 \quad (2.4)$$

III. Horní a spodní stěna

$$S_{13} = 2 * (a * b) = 2 * (0,035 + 0,18 + 0,035) * (0,035 + 0,4 + 0,035) = 0,235 \text{ m}^2 \quad (2.5)$$

Výsledný povrch je tedy:

$$A_{SiC,Sibral} = S_{11} + S_{12} + S_{13} = 0,095 + 0,1786 + 0,235 = 0,5086 \text{ m}^2 \quad (2.6)$$

b) Povrch mezi Sibralem a ocelovým pláštěm:

I. Přední a zadní stěna

$$\begin{aligned} S_{21} &= 2 * (a * b) = 2 * (0,133 + 0,25 + 0,133) * (0,264 + 0,19 + 0,264) \\ &= 0,740976 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

II. Boční stěny

$$\begin{aligned} S_{22} &= 2 * (a * b) = 2 * (0,178 + 0,47 + 0,178) * (0,264 + 0,19 + 0,264) \\ &= 1,186136 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (2.8)$$

III. Horní a spodní stěna

$$\begin{aligned} S_{23} &= 2 * (a * b) = 2 * (0,133 + 0,25 + 0,133) * (0,178 + 0,47 + 0,178) \\ &= 0,852432 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Výsledný povrch je tedy:

$$\begin{aligned} A_{Sibral,Ocel} &= S_{21} + S_{22} + S_{23} = 0,740976 + 1,186136 + 0,852432 \\ &= 2,779544 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (2.10)$$

c) Povrch mezi ocelovým pláštěm a vnějším povrchem je roven vnějšímu povrchu pece, který je spočtený ve vztahu (2.2). Počítáno pouze pro kontrolu.

I. Přední a zadní stěna

$$\begin{aligned} S_{31} &= 2 * (a * b) \\ &= 2 * (0,002 + 0,516 + 0,002) * (0,002 + 0,718 + 0,002) \\ &= 0,75088 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (2.11)$$

II. Boční stěny

$$\begin{aligned}
 S_{32} &= 2 * (a * b) \\
 &= 2 * (0,002 + 0,826 + 0,002) * (0,002 + 0,718 + 0,002) \\
 &= 1,19852 \text{ m}^2
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

III. Horní a spodní stěna

$$\begin{aligned}
 S_{33} &= 2 * (a * b) \\
 &= 2 * (0,002 + 0,516 + 0,002) * (0,002 + 0,826 + 0,002) \\
 &= 0,8632 \text{ m}^2
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

Výsledný povrch je tedy:

$$\begin{aligned}
 A_{Ocel,vmějši} &= S_{31} + S_{32} + S_{33} = 0,75088 + 1,19852 + 0,8632 \\
 &= 2,8126 \text{ m}^2
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

Podle vztahu (2.2) a (2.14) je vidět rovnost výsledků a máme tedy jistotu, že jsme povrchy mezi dílčími vrstvami spočítaly správně. Nyní můžeme spočítat střední povrch karbidu křemíku a sibralu.

$$A_{stř,SiC} = \frac{A_{vni} + A_{SiC,Sibral}}{2} = \frac{0,2832 + 0,5086}{2} = 0,3959 \text{ m}^2 \tag{2.15}$$

$$\begin{aligned}
 A_{stř,Sibral} &= \frac{A_{SiC,Sibral} + A_{Sibral,ocel}}{2} = \frac{0,5086 + 2,779544}{2} \\
 &= 1,644072 \text{ m}^2
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

$$A_{stř, ocel} = \frac{A_{Sibral, ocel} + A_{vně}}{2} = \frac{2,779544 + 2,8126}{2} = 2,796072 \text{ m}^2 \quad (2.17)$$

Hmotnost jednotlivých vrstev můžeme nyní spočítat takto:

- **hmotnost SiC:**

$$m_{SiC} = \rho_{SiC} * A_{stř, SiC} * d_{SiC} = 3100 * 0,3959 * 0,035 = 42,96 \text{ kg} \quad (2.18)$$

- **hmotnost Sibralu:**

$$\begin{aligned} m_{Sibral} &= \rho_{Sibral} * A_{stř, Sibral} * d_{Sibral} = 300 * 1,644072 * 0,1917 \\ &= 94,55 \text{ kg} \end{aligned} \quad (2.19)$$

- zde jsem kvůli rozdílným tloušťkám Sibralu uvažoval výslednou tloušťku jako aritmetický průměr z rozměrů 0,133 m, 0,264 m a 0,178 m.

- **hmotnost ocelového pláště:**

$$m_{ocel} = \rho_{ocel} * A_{stř, ocel} * d_{ocel} = 7800 * 2,77146 * 0,002 = 43,23 \text{ kg} \quad (2.20)$$

- **Celková hmotnost vyzdívky a pláště pece je:**

$$m_C = m_{SiC} + m_{Sibral} + m_{ocel} = 42,96 + 94,55 + 43,23 = 180,74 \text{ kg} \quad (2.21)$$

2.2 Tepelný výpočet

Pro zjištění potřebného výkonu je nutné si uvědomit následující. Celkový potřebný výkon dodaný za určitý čas, kdy dochází k elektrotepelnému procesu v peci je roven teplu akumulovanému a teplu, které je udáno v podobě ztrát do okolí a k ohřevu vsázky. Tímto postupem získáme představu o potřebném výkonu.

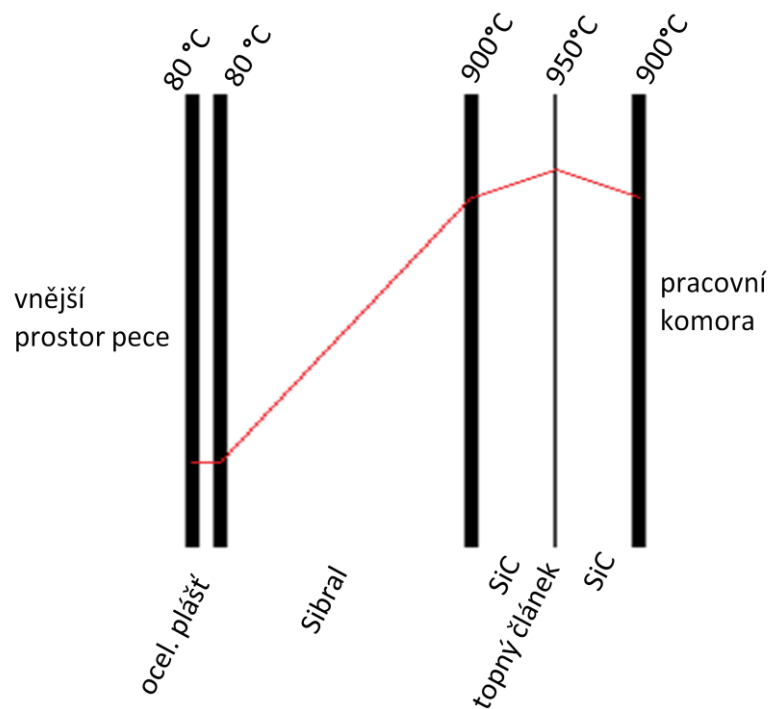
$$P_{z celk} = \frac{Q_{z celk}}{t} \quad (2.22)$$

$$Q_{z celk} = Q_{aku} + Q_{z tep} + Q_{vsa} \quad (2.23)$$

Při výpočtu budu postupovat tak, že nejprve vypočítám tepelné ztráty pro prázdnou pec a následně k ustálenému stavu připočtu i ztráty akumulací tepla a ztráty nutné k ohřevu vsázky.

2.2.1 Tepelné ztráty prázdné pece

Při výpočtech pro tepelné ztráty budu zanedbávat ocelový plášť. U oceli se uvažuje, že teplota na obou stranách stěny ocelového pláště bude vlivem vysoké tepelné vodivosti stejná. Dále musíme vycházet z podmínky, že teplota na rozhraní mezi tepelnou izolací typu Sibrál a ocelovým pláštěm nesmí překročit 80 °C ($\vartheta_{po, 2} = 80\text{ °C}$). V zadání máme pracovní teplotu 900 °C ($\vartheta_p = 900\text{ °C}$), proto si jako další podmínku zvolíme teplotu, která musí být na vnitřním povrchu pracovní komory právě takto ($\vartheta_{po, 1} = 900\text{ °C}$). Uvažují-li, že topný článek v muflí je navinut přesně uprostřed a jeho teplota je $\vartheta_{top} = 950\text{ °C}$, pak bude teplota $\vartheta_{po, 1} = 900\text{ °C}$ platit i pro rozhraní mezi muflí z karbidu křemíku a Sibralem. Teplota na vnějším povrchu pece bude uvažována jako teplota okolí 20 °C , tedy $\vartheta_{ok} = 20\text{ °C}$. Budu tedy počítat ztráty tepla vícevrstvou rovinnou stěnou s odhadnutými povrchovými teplotami, které můžeme vidět na obrázku 2.1. Přičemž povrchy jednotlivých vrstev jsou uvažovány jako různé velikosti.



Obr. 2.1 Rozložení jednotlivých vrstev a jejich povrchové teploty

Dále je nutné dopočítat střední plochy pro jednotlivé stěny a jejich vrstvy obdobně jako v kapitole 2.1.1 a určit součinitele přestupu tepla na vnějším prostředí podle [4], přičemž součinitel přestupu tepla na vnitřním povrchu můžeme zanedbat.

I. Přední a zadní stěna

Potřebné střední obsahy ploch:

$$S_{vni,1} = 2 * (a * b) = 2 * (0,18 * 0,12) = 0,0432 \text{ m}^2 \quad (2.24)$$

$$F_{11} = \sqrt{S_{vni,1} * S_{11}} = \sqrt{0,0432 * 0,095} = 0,064 \text{ m}^2 \quad (2.25)$$

$$F_{12} = \sqrt{S_{11} * S_{21}} = \sqrt{0,095 * 0,740976} = 0,2653 \text{ m}^2 \quad (2.26)$$

Součinitel přestupu tepla α_1 (svislá stěna):

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 4,01 * (\Delta\vartheta)^{0,13} = 4,01 * (\vartheta_{po,2k} - \vartheta_{ok})^{0,13} = 4,01 * (60 - 20)^{0,13} \\ &= 6,828 \text{ W} * \text{m}^{-2} * \text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Tepelné ztráty můžeme tedy vypočítat podle následujícího vztahu, kde $\lambda_{Sibral,stř} = 0,13$ je zvolena podle střední teploty, kterou jsem vypočítal z odhadnutých hodnot:

$$\begin{aligned} Q_{z\text{ tep},1} &= \frac{\vartheta_{po,1} - \vartheta_{ok}}{\frac{l_1}{\lambda_{Sic} * F_{11}} + \frac{l_{22}}{\lambda_{Sibral,stř} * F_{12}} + \frac{1}{\alpha_1 * S_{31}}} \\ &= \frac{900 - 20}{\frac{0,035}{60 * 0,064} + \frac{0,178}{0,13 * 0,2653} + \frac{1}{6,828 * 0,75088}} = 164 \text{ W} \end{aligned} \quad (2.28)$$

II. Boční stěny

Potřebné střední obsahy ploch:

$$S_{vni,2} = 2 * (a * b) = 2 * (0,4 * 0,12) = 0,096 \text{ m}^2 \quad (2.29)$$

$$F_{21} = \sqrt{S_{vni,2} * S_{12}} = \sqrt{0,096 * 0,1786} = 0,1309 \text{ m}^2 \quad (2.30)$$

$$F_{22} = \sqrt{S_{12} * S_{22}} = \sqrt{0,1786 * 1,186136} = 0,4603 \text{ m}^2 \quad (2.31)$$

Součinitel přestupu tepla $\alpha_1 = \alpha_2$ (svislá stěna):

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= 4,01 * (\Delta\vartheta)^{0,13} = 4,01 * (\vartheta_{po,2k} - \vartheta_{ok})^{0,13} = 4,01 * (80 - 20)^{0,13} \\ &= 6,828 \text{ W} * \text{m}^{-2} * \text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (2.32)$$

Tepelné ztráty můžeme tedy vypočítat podle následujícího vztahu:

$$\begin{aligned} Q_{z \text{ tep},2} &= \frac{\vartheta_{po,1} - \vartheta_{ok}}{\frac{l_1}{\lambda_{sic} * F_{21}} + \frac{l_2}{\lambda_{sibral,stř} * F_{22}} + \frac{1}{\alpha_2 * S_{32}}} \\ &= \frac{900 - 20}{\frac{0,035}{60 * 0,1309} + \frac{0,133}{0,13 * 0,4603} + \frac{1}{6,828 * 1,19852}} \\ &= 374,58 \text{ W} \end{aligned} \quad (2.33)$$

III. Horní a spodní stěna

Potřebné střední obsahy ploch:

$$S_{vni,3} = 2 * (a * b) = 2 * (0,4 * 0,18) = 0,144 \text{ m}^2 \quad (2.34)$$

$$F_{31} = \sqrt{S_{vni,3} * S_{13}} = \sqrt{0,144 * 0,235} = 0,184 \text{ m}^2 \quad (2.35)$$

$$F_{32} = \sqrt{S_{13} * S_{23}} = \sqrt{0,235 * 0,852432} = 0,4476 \text{ m}^2 \quad (2.36)$$

Součinitel přestupu tepla α_4 (spodní stěna):

$$\begin{aligned}\alpha_3 &= 1,31 * (\Delta\vartheta)^{0,25} = 1,31 * (\vartheta_{po,2k} - \vartheta_{ok})^{0,25} = 1,31 * (80 - 20)^{0,25} \\ &= 3,646 \text{ W} * \text{m}^{-2} * \text{K}^{-1}\end{aligned}\quad (2.37)$$

Tepelné ztráty můžeme tedy vypočítat podle následujícího vztahu:

$$\begin{aligned}Q_{z\text{ tep},3} &= \frac{\vartheta_{po,1} - \vartheta_{ok}}{\frac{l_1}{\lambda_{SiC} * F_{31}} + \frac{l_{21}}{\lambda_{Sibral} * F_{32}} + \frac{1}{\alpha_3 * S_{33}}} \\ &= \frac{900 - 20}{\frac{0,035}{60 * 0,184} + \frac{0,264}{0,13 * 0,4476} + \frac{1}{3,646 * 0,8632}} \\ &= 181,15 \text{ W}\end{aligned}\quad (2.38)$$

Celkové tepelné ztráty přestupem tepla při pracovní teplotě jsou tedy:

$$\begin{aligned}Q_{z\text{ tep}} &= Q_{z\text{ tep},1} + Q_{z\text{ tep},2} + Q_{z\text{ tep},3} = 164 + 374,58 + 181,15 \\ &= 719,73 \text{ W}\end{aligned}\quad (2.39)$$

2.2.2 Kontrola teplot na rozhraních

I. Přední a zadní stěna

$$\vartheta_{SiC,Sibral} = \vartheta_{po,1} - \frac{Q_{z\text{ tep},1} * l_1}{F_{11} * \lambda_{SiC}} = 900 - \frac{164 * 0,035}{0,064 * 60} = 898,5 \text{ } ^\circ\text{C}\quad (2.40)$$

$$\begin{aligned}\vartheta_{Sibral,ocel} &= \vartheta_{SiC,Sibral} - \frac{Q_{z\text{ tep},1} * l_{22}}{F_{12} * \lambda_{Sibral,stř}} = 898,5 - \frac{164 * 0,178}{0,2653 * 0,13} \\ &= 52,1 \text{ } ^\circ\text{C}\end{aligned}\quad (2.41)$$

$$\vartheta_{po,2} = \vartheta_{Sibral,ocel} - \frac{Q_{z tep,1}}{S_{31} * \alpha_1} = 52,1 - \frac{164}{0,75088 * 6,828} = 20 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.42)$$

- ***Střední teploty vyzdívky***

$$\vartheta_{stř,SiC} = \frac{\vartheta_p + \vartheta_{SiC,Sibral}}{2} = \frac{900 + 898,5}{2} = 899,25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.43)$$

$$\vartheta_{stř,Sibral} = \frac{\vartheta_{SiC,Sibral} + \vartheta_{Sibral,ocel}}{2} = \frac{898,5 + 52,1}{2} = 475,3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.44)$$

II. Boční stěny

$$\vartheta_{SiC,Sibral} = \vartheta_{po,1} - \frac{Q_{z tep,2} * l_1}{F_{21} * \lambda_{SiC}} = 900 - \frac{374,58 * 0,035}{0,1309 * 60} = 898,3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.45)$$

$$\begin{aligned} \vartheta_{Sibral,ocel} &= \vartheta_{SiC,Sibral} - \frac{Q_{z tep,2} * l_2}{F_{22} * \lambda_{Sibral,stř}} = 898,3 - \frac{374,58 * 0,133}{0,4603 * 0,13} \\ &= 65,7 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (2.46)$$

$$\vartheta_{po,2} = \vartheta_{Sibral,ocel} - \frac{Q_{z tep,2}}{S_{32} * \alpha_2} = 65,7 - \frac{374,58}{1,19852 * 6,828} = 19,9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.47)$$

- ***Střední teploty vyzdívky***

$$\vartheta_{stř,SiC} = \frac{\vartheta_p + \vartheta_{SiC,Sibral}}{2} = \frac{900 + 898,3}{2} = 899,15 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.48)$$

$$\vartheta_{stř,Sibral} = \frac{\vartheta_{SiC,Sibral} + \vartheta_{Sibral,ocel}}{2} = \frac{898,3 + 65,7}{2} = 482 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.49)$$

III. Horní a spodní stěna

$$\vartheta_{SiC,Sibral} = \vartheta_{po,1} - \frac{Q_{z tep,3} * l_1}{F_{31} * \lambda_{SiC}} = 900 - \frac{181,15 * 0,035}{0,184 * 60} = 899,4 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.50)$$

$$\begin{aligned}\vartheta_{Sibral,ocel} &= \vartheta_{SiC,Sibral} - \frac{Q_{z tep,3} * l_{21}}{F_{32} * \lambda_{Sibral,stř}} = 899,5 - \frac{181,15 * 0,264}{0,4476 * 0,13} \\ &= 77,52 \text{ } ^\circ\text{C}\end{aligned}\quad (2.51)$$

$$\vartheta_{po,2} = \vartheta_{Sibral,ocel} - \frac{Q_{z tep,3}}{S_{33} * \alpha_3} = 188,1 - \frac{181,15}{0,8632 * 3,646} = 19,96 \text{ } ^\circ\text{C}\quad (2.52)$$

- **Sřední teploty vyzdívek**

$$\vartheta_{stř,SiC} = \frac{\vartheta_p + \vartheta_{SiC,Sibral}}{2} = \frac{900 + 899,4}{2} = 899,7 \text{ } ^\circ\text{C}\quad (2.53)$$

$$\vartheta_{stř,Sibral} = \frac{\vartheta_{SiC,Sibral} + \vartheta_{Sibral,ocel}}{2} = \frac{899,4 + 77,52}{2} = 488,46 \text{ } ^\circ\text{C}\quad (2.54)$$

Pro všechny stěny byla splněna podmínka na rozhraní $\vartheta_{Sibral,ocel} < 80 \text{ } ^\circ\text{C}$. Proto můžeme pokračovat dále ve výpočtech. Pokud by podmínka splněna nebyla, bylo by nutné přidat další vrstvu izolačního materiálu, nebo změnit typ materiálu.

2.2.3 Akumulované teplo ve vyzdívkách a vsázce

Pro výpočet akumulovaného tepla jsem použil hodnotu střední teploty jednotlivých vyzdívek vždy jako aritmetický průměr středních teplot všech stěn. Akumulované teplo ve vyzdívkách a vsázce při pracovní teplotě $\vartheta_p = 900 \text{ } ^\circ\text{C}$ při zanedbání ocelového pláště lze vypočítat takto:

- **Pro SiC:**

$$\begin{aligned}Q_{aku,SiC} &= m_{SiC} * c_{SiC} * (\vartheta_{stř,SiC} - \vartheta_{ok}) = 42,96 * 3100 * (899,4 - 20) \\ &= 117,1 * 10^6 \text{ J}\end{aligned}\quad (2.55)$$

- **pro Sibral:**

$$\begin{aligned}Q_{aku,Sibral} &= m_{Sibral} * c_{Sibral} * (\vartheta_{stř,Sibral} - \vartheta_{ok}) \\ &= 94,55 * 300 * (481,92 - 20) = 13,1 * 10^6 \text{ J}\end{aligned}\quad (2.56)$$

- **pro vsázku z oceli:**

Pro vsázku je ještě nutné dopočítat její objem, abychom mohli zjistit celkovou hmotnost vsázky:

$$m_{vs} = \rho_{vs} * V_{vs} = \rho_{vs} * (a * b * c) = 7800 * (0,2 * 0,04 * 0,1) = 6,24 \text{ kg} \quad (2.57)$$

$$\begin{aligned} Q_{aku,vs} &= m_{vs} * c_{vs} * (\vartheta_p - \vartheta_{ok}) = 6,24 * 680 * (900 - 20) \\ &= 3,734016 * 10^6 \text{ J} \end{aligned} \quad (2.58)$$

- **celkové akumulované teplo ve vyzdívce:**

Akumulované teplo ve vyzdívce pece budu uvažovat pro dvě různé možnosti. První varianta bude pro akumulované teplo při roztápní pece pro čas za 1 hodinu a druhá pro čas za 6 hodin.

a) roztápní pece $t_1 = 1 \text{ [h]} = 3600 \text{ [s]}$

$$\begin{aligned} Q_{aku} &= Q_{aku,Sic} + Q_{aku,Sibral} = 117,1 * 10^6 + 3,64 * 10^6 = 120,74 * 10^6 \text{ J} \\ &= 33,54 \text{ kW} \end{aligned} \quad (2.59)$$

b) roztápní pece $t_2 = 6 \text{ [h]} = 21600 \text{ [s]}$

$$\begin{aligned} Q_{aku} &= Q_{aku,Sic} + Q_{aku,Sibral} = 117,1 * 10^6 + 3,64 * 10^6 = 120,74 * 10^6 \text{ J} \\ &= 5,59 \text{ kW} \end{aligned} \quad (2.60)$$

2.3 Elektrický výpočet

V této kapitole určím výkon pece pomocí užitečného tepla, tepelných ztrát stěnami pece a akumulovaného tepla ve vyzdívce, také provedu výpočet pro topný článek z materiálu Kanthal A-1.

2.3.1 Výpočet příkonu pece

Nejprve si vypočítám užitečný příkon pece $P_{už}$, tj. výkon potřebný k ohřátí vsázky:

$$P_{už} = \frac{Q_{už}}{t_{ohř}} = \frac{3,734016 * 10^6}{21600} = 172,87 \text{ W} \quad (2. 61)$$

kde: $Q_{už}$ – energie k ohřátí vsázky [J] (vypočteno ve vztahu (2.58))

$t_{ohř}$ – doba ohřevu vázky [s] (podle zadání práce jsem zvolil $t_{ohř} = 6\text{h} = 21600\text{ s}$)

Potřebný příkon P topných článků pro krytí ztrát, vyhřátí pece a ohřev vsázky lze spočítat za pomoci užitečného příkonu pece $P_{už}$ a ztrátového celkového výkonu P_{zcelk} , který odpovídá ztrátám tepla stěnami a akumulovaným teplem ve vyzdívce. Výpočet provedu opět pro obě varianty roztápění pece.

a) roztápění pece $t_1 = 1 \text{ [h]}$

$$\begin{aligned} P &= k_b * (P_{už} + P_{zcelk}) = 1,2 * (P_{už} + Q_{aku} + Q_{z tep}) \\ &= 1,2 * (172,87 + 33,54 * 10^3 + 719,73) = 41,32 \text{ kW} \end{aligned} \quad (2. 62)$$

kde: k_b – koeficient respektující nepřesnosti výpočtů, stárnutí topných článků a rezervu na pokles napětí sítě, který je dle [3] v rozmezí 1,2 -1,7 (zvoleno $k_b = 1,2$)

Podle vypočteného výkonu jsem zvolil výkon pece 42 kW, protože vzhledem k připojení do 3-fázové sítě je to výhodné. Výkon je totiž dělitelný třemi a pro každou fázi případně $P_{1f} = 14000 \text{ W}$.

b) roztápění pece $t_2 = 6 \text{ [h]}$

$$\begin{aligned} P &= k_b * (P_{už} + P_{zcelk}) = 1,2 * (P_{už} + Q_{aku} + Q_{z tep}) \\ &= 1,2 * (172,87 + 5,59 * 10^3 + 719,73) = 7,78 \text{ kW} \end{aligned} \quad (2. 63)$$

Výkon pece jsem zvolil 7,8 kW. Pro každou fázi pak případně $P_{1f} = 2600 \text{ W}$.

2.3.2 Výpočet topného článku

Topný článek je v peci nejteplejším místem. Přenos tepla vedením je zanedbatelně malý. Teplo je předáváno hlavně sáláním, ale i prouděním pecní atmosféry. Jak jsem již zmínil v kapitole 2.2.1, pro pracovní teplotu 900 °C jsem zvolil topný drát Kanthal A-1 s teplotou článku 950 °C. Kanthal A-1 patří mezi feritické slitiny, je vysoce žáruvzdorný a jeho hlavními složkami jsou Cr, Al, Fe. (viz kapitola 1.5.1.) Navrhnou zapojení topných článků v peci trojfázově pro 3-f síť.

Dle výpočtu [5] si zjistím odpor R z napětí U , na které je článek připojen a z požadovaného výkonu článku P_{1f} :

a) *roztápění pece $t_1 = 1$ [h]*

$$R = \frac{U_{1f}^2}{P_{1f}} = \frac{230^2}{14000} = 3,78 \Omega \quad (2.64)$$

Dále si z katalogového listu pro Kanthal A-1 odečtu potřebné parametry pro pracovní teplotu článku 950 °C, mezi které patří povrchové zatížení topného drátu p , konstanta c_1 a rezistivita ρ . Parametry pro výpočet jsou přehledně uvedeny v tabulce 2.5.

p [W/cm ²]	4
c_1 [-]	1,035
ρ [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]	1,45

Tab. 2.5 parametry pro výpočet průměru topného drátu

Nyní si můžeme vypočítat odpor článku za studena R_{20} , kde konstanta c_1 respektuje změnu odporu drátu při pracovní teplotě oproti 20 °C a je bezrozměrná:

$$R_{20} = \frac{R}{c_1} = \frac{3,78}{1,035} = 3,65 \Omega \quad (2.65)$$

Z výše získaných a vypočtených hodnot podle vztahu (2.64) vypočtu průměr drátu d' :

$$d' = \sqrt[3]{\frac{4 * \rho * P_{1f}}{10 * \pi^2 * p * R_{20}}} = \sqrt[3]{\frac{4 * 1,45 * 14000}{10 * \pi^2 * 4 * 3,65}} = 3,83 \text{ mm} \quad (2.66)$$

Tento průměr porovnám s katalogem a odečtu nejbližší vyšší hodnotu d :

zvoleno $d = 4 \text{ mm}$

Délka topného drátu je:

$$l = \frac{R_{20}}{R_{1m}} = \frac{3,65}{0,115} = 31,74 \text{ m} \quad (2.67)$$

kde: l – délka drátu [m]

R_{1m} – odpor 1m drátu [Ω] (vyhledáno v katalogových listech Kanthal A-1)

Pro kontrolu vypočtu, zdali jsem nepřekročil zvolené povrchové zatížení p :

$$p = \frac{P}{10 * \pi * d * l} = \frac{14000}{10 * \pi * 4 * 31,74} = 3,51 \text{ W} * \text{cm}^{-2} \quad (2.68)$$

povrchové zatížení $p < 4$. Výsledek je tedy správný.

Aby bylo možné dostat topný drát do vymezeného prostoru je drát navinut do tvaru spirály o průměru D_1 a stoupání s . Pro teploty do 1000 °C je předepsaný vnější průměr spirály D_1 v rozsahu $5d - 7d$ a stoupání spirály s by mělo být $2d - 3d$.

$$D_1 = 5 * d = 5 * 4 = 20 \text{ mm} \quad (2.69)$$

Výpočet délky jednoho závitu je:

$$l_1 = \pi * (D_1 + d) = \pi * (0,02 + 0,004) = 0,075 \text{ m} \quad (2.70)$$

Výpočet počtu závitů z je:

$$z = \frac{l}{l_1} = \frac{31,74}{0,075} = 423,2 \quad (2.71)$$

Výpočet délky uložení l_u při zvoleném stoupání spirály $s = 2d$ je:

$$l_u = s * z = 2 * d * z = 2 * 0,004 * 423,2 = 3,39 \text{ m} \quad (2.72)$$

b) roztápění pece $t_2 = 6$ [h]

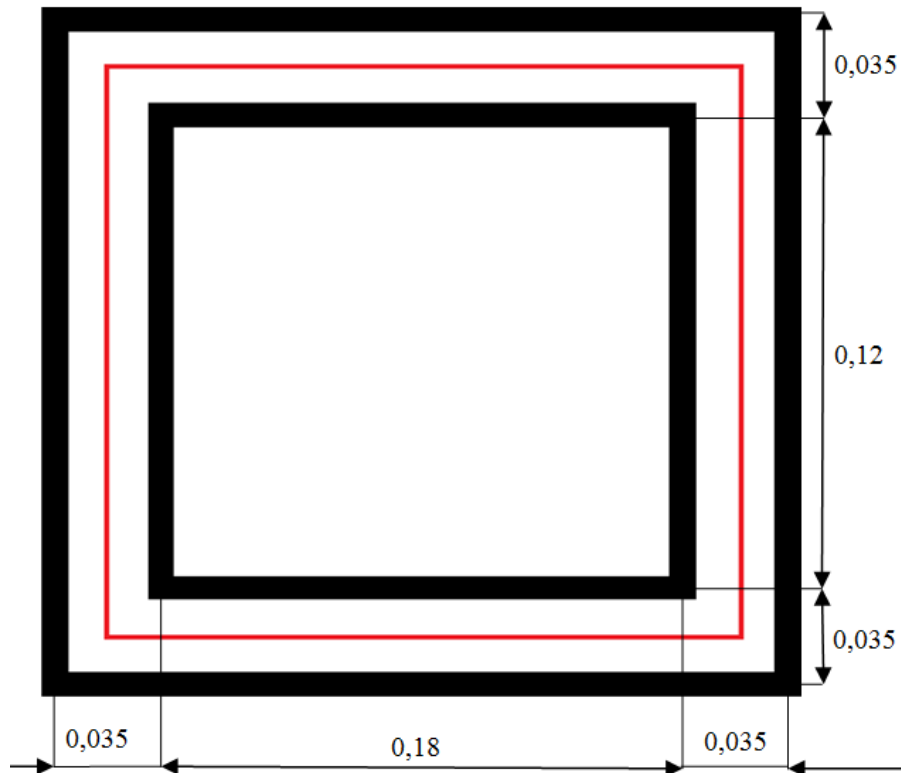
Pro variantu **b)** je výpočet stejný, pouze se liší hodnotami P . Podle literatury [4] se odporové pece nad 10 kW navrhují zpravidla trojfázově, aby bylo možné rozdělit příkon na menší části. Pro variantu **b)** s výkonem $P = 7800$ W jsem uvažoval tedy i možnost zapojení odporového článku jednofázově. Výsledné hodnoty jsem uvedl do přehledné tabulky 2.6

Varianta	P [W]	U [V]	R [Ω]	R ₂₀ [Ω]	d' [mm]	d [mm]	l [m]	D ₁ [mm]	l ₁ [m]	z [-]	l _u [m]
a) 3-f/U _f	14000	230	3,78	3,65	3,83	4	31,74	20	0,075	424	3,39
b) 3-f/U _f	2600	230	20,35	19,66	1,25	1,3	18,04	6,5	0,025	722	1,88
b) 1-f/U _f	7800	230	6,78	6,55	2,6	2,75	26,84	13,75	0,052	517	2,84

Tab. 2.6 Výsledné hodnoty výpočtů pro výpočet průměru topného drátu

Pro variantu **b)** 1 – f /U_f vypočítám, jestli je možné délku uložení l_u navinout do středu mnou navržené mufle přes boční stěny, strop a dno. Nejprve musím zjistit střední obvod SiC mufle pro jeden závit spirály, který vypočítám podle vztahu (2.73) a je znázorněn na obr 2.2.

$$\begin{aligned} O_{1\text{závit spirály}} &= (2 * a + l_1) + (2 * b + l_1) \\ &= (2 * (0,18 + 0,035)) + (2 * (0,12 + 0,035)) = 0,74 \text{ m} \end{aligned} \quad (2.73)$$



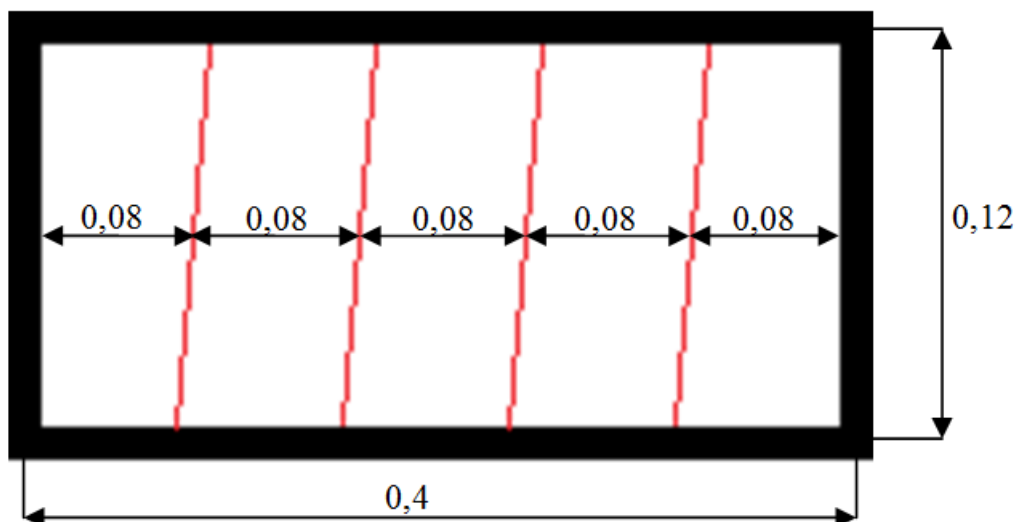
Obr. 2.2 Umístění 1 závitu navinutého ve středu mufle

Dále si vypočítám potřebný počet závitů N pomocí délky uložení l_u a obvodu jednoho závitu na mufli $O_{1\text{závit spirály}}$ podle vztahu (2.74).

$$N = \frac{l_u}{O_{1\text{závit spirály}}} = \frac{2,84}{0,74} = 4 \text{ závity} \quad (2.74)$$

Podle vztahu (2.75) a obr. 2.3 je vidět výpočet délky jedné mezery mezi jednotlivými závity. Délka SiC mufle je $c = 0,4$ m.

$$l_{\text{mezery}} = \frac{c}{\text{počet mezer}} = \frac{0,4}{5} = 0,08 \text{ m} \quad (2.75)$$



Obr. 2.3 Navinutá topná spirála v SiC mufli o délce 0,4 metru

2.3.3 Regulace teploty v peci

Druhy regulací, jejich základní parametry a senzory teplot jsem popsal blíže v kapitole 1.6.1 a 1.6.2. Nabídka regulátorů v současné době je velmi široká. Já jsem zvolil výrobek od firmy Thermoprozess typu Watlow PM. Tento regulátor je schopný dvupolohové, PID regulace a regulace na konstantní hodnotu. Je vybaven vstupy pro různé typy termočlánků a výstupy jsou pro řízení tyristorové jednotky či kontaktního spínače.

Na měřicí vstup regulátoru je přiváděn signál z termočlánku. Pro pracovní teplotu 950 °C můžeme použít termočlánek PtRh10-Pt typu S, který se běžně používá do teplot až 1500 °C.

Pro volbu správného jističe provedu elektrický výpočet podle vztahu (2.76) pro variantu zapojení topného článku 1-f/U_f z tabulky 2.6.

$$I = \frac{P}{U} = \frac{7800}{230} = 33,9 \text{ A} \quad (2.76)$$

Pro tento proud jsem přiřadil jednopólový jistič LTE-40C-1 od firmy OZE, který chrání vodiče proti přetížení a zkratu.

3 Zhodnocení práce

V tomto bodě se budu zabývat úvahou o vypočítaných hodnotách mnou navrhované muflové pece z hlediska provozních vlastností a energetické náročnosti.

3.1 Provozní vlastnosti

Vypočítaný výkon s ohledem na roztápění pece za 1 hodinu vyšel 41,32 kW. To je pro ohřev tak malé vsázky s hmotností 6,24 kg příliš neefektivní. Dodávaný příkon by sice takto navrženou pec vyhřál za jednu hodinu, avšak po naakumulování tepla do stěn vyzdívky by zůstal téměř nevyužitý. Navíc by topný článek při tak velkém výkonu musel být řešen trojfázově, aby se výkon dal rozložit na menší části. Vzhledem k tomu, že jsem zprvu uvažoval, aby byl topný článek navinut přes boční stěny, strop a dno pece, bylo by dosti obtížné rozdělit jej do tří fází. Proto jsem jako další možnou variantu navrhl roztápění pece za 6 hodin, kde potřebný výkon vyšel 7,78 kW. Pro tento výkon jsem navrhl topný článek jak trojfázově, tak i jednofázově. Tento výkon je podstatně menší. To se příznivě projeví jak na velikosti průměru topného drátu, tak i na jeho celkové délce a hmotnosti.

Pro variantu zapojení topného článku 1-f/ U_f jsem vybral regulátor typu Watlow PM dostupný běžně na internetových stránkách regulující teplotu v peci na požadovanou pracovní hodnotu.

3.2 Energetická náročnost

Abych zjistil energetickou náročnost mnou navržené pece, jeví se jako nejlepší možnost vypočítat účinnost pece. Při tomto výpočtu budu uvažovat, že pec je již roztopená a tedy v ustáleném stavu.

$$\eta = \frac{P_{u\dot{z}}}{P_{z\text{ tep}}} * 100 = \frac{172,87}{719,73} * 100 = 24 \% \quad (3.1)$$

Výsledná účinnost pece je velmi malá. To je způsobeno tím, že jsem při tepelném výpočtu použil pouze jednu vrstvu izolačního materiálu ze Sibalových desek. Tímto výpočtem jsem si zároveň ověřil, že při tepelném návrhu pece je téměř nereálné použití pouze jedné vrstvy izolačního materiálu. Abych dosáhl vyšší účinnosti, bylo by nutné

provést tepelný výpočet znovu a zvolit větší množství izolačních vrstev s rozdílnými tepelnými vodivostmi, klesajícími směrem k vnějšímu povrchu.

Vzhledem k rozměrům vsázky a rozměrům vnitřního pracovního prostoru pece by bylo možné vložit dvě vsázky těsně za sebe. Tímto způsobem by se zvýšil užitečný výkon pece a zároveň i účinnost o dvojnásobek.

Závěr

V mé diplomové práci jsem se zabýval návrhem elektrické odporové muflové pece. Hlavním úkolem této práce bylo pro tuto pec provést konstrukční provedení, tepelný a elektrický výpočet. Muflová pec měla být navržena pro zadané vnitřní a vnější rozměry s pracovní teplotou 900 °C. Dále byly zadány rozměry vsázky s rychlostí jejího ohřevu, které jsou v rozmezí 150 °C – 200 °C za hodinu.

V teoretickém úvodu jsem se zabýval základními zákony šíření tepla uplatňujících se v odporových pecích, principy pro odporové ohřevy, materiály používané pro vyzdívky, topné články a uvedl jsem možné typy pro regulaci elektrických odporových pecí.

Na samotném začátku návrhu jsem podle zadaných vnitřních a vnějších rozměrů pece určil tloušťky jednotlivých vrstev, z nichž jsem mohl vypočítat dílčí povrchy a určit tak přibližnou hmotnost pece, která vyšla 180,74 kg. Z užitečného tepla nutného k ohřátí vsázky a tepelných ztrát jsem určil výkon pece. Pro ohřev vsázky o hmotnosti 6,24 kg jsem tedy vypočítal výkon pro dvě varianty, kde jsem bral v úvahu rychlost roztápění pece pro 1 hodinu a 6 hodin. Při roztápění pece 1 hodinu mi vyšel výkon 41,32 kW a pro 6 hodin vyšel výkon 7,78 kW. Pro tyto výkony jsem provedl elektrický výpočet a navrhl varianty zapojení topných článků vyrobených z materiálu KANTHAL A-1. Pro regulaci teploty jsem vybral regulátor od firmy Thermoprozess typu Watlow PM který získává informaci o teplotě v prostoru pece pomocí termočlánku PtRh10-Pt typu S připojeného na jeho vstup.

Během vypracovávání této diplomové práce jsem nabyl mnoho teoretických znalostí týkajících se návrhu elektrických odporových pecí, avšak k hlubšímu pochopení této problematiky by bylo potřeba více praktických zkušeností.

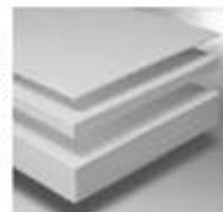
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ROT, David. *Základy elektrotepelných procesů*. (přednáška: Sdílení tepla v elektrotepelných zařízeních) Plzeň, ZČU.
- [2] ROT, David. *Základy elektrotepelných procesů*. (přednáška: Elektrický odporový ohřev -) Plzeň, ZČU.
- [3] RADA, Josef a kol. *Elektrotepelná technika*. Praha: SNTL/ALFA, 1985.
- [4] LANGER, Emil. *Elektrotepelná technika: část I.: společné základy: část II.: elektrické pece odporové*. 2.vyd. Plzeň: VŠSE, 1974.
- [5] DOLEJŠÍ, Miroslav a Vladimír TOMEK. *Elektrické odporové pece a sušárny*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1967.
- [6] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [7] BRUNKLAUS, Henri J. *Stavba průmyslových pecí*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966.
- [8] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-010-1500-9.
- [9] KADLEC, Karel a Miloš KMÍNEK. *Měřicí a řídicí technika: Regulace* [online]. 2005 [cit. 2013-10-12]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F3/F3-ram.htm>
- [10] LUCÁK, Jiří. *Inovační prvky v návrhu elektrotepelných odporových zařízení*. (disertační práce) Plzeň, ZČU.
- [11] HANZLÍK, Radim. *Návrh elektrické odporové pece pro výpal keramiky*. (diplomové práce) Plzeň, ZČU, 2004.
- [12] KANTHAL HANDBUCH Heizleiterlegierungen für Industrieöfen KANTHAL AB, ISBN 91-86720-06-6
- [13] *Thermoprozess s.r.o: český výrobce měřicí a regulační techniky* [online]. Dostupné také z: <http://www.thermoprozess.cz>
- [14] *OEZ s.r.o* [online]. Dostupné také z: <http://www.oez.cz>

Katalogové listy výrobců

Desky z keramických vláken

Desky jsou vyráběny ze žárovzdorného hliníkokřemičitého vlákna Sibra, které je vyráběno tavením velmi čistých surovin a poté rozvlákněním taveniny rotačním způsobem. Vzniklé vlákno je zkráceno na vhodnou délku. Po smísení těchto vláken s pojivou jsou vakuovou technologií vyráběny desky. Desky je možno vyrábět ze dvou základních typů vláken: Sibra STANDARD s klasifikační teplotou 1260 °C a Sibra SUPER s klasifikační teplotou 1430 °C.



Technická data

	Sibra STANDARD	Sibra SUPER
Klasifikační teplota	1260 °C	1430 °C
Specifické teplo při 900 °C		969 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Průměrná tloušťka vláken	do 5 μm	do 5 μm
Obsah organických látek		max. 6 % hm.
Vlhkost při expedici		max. 1 % hm.
Barva		bílá až nahnědlá
Dodatečná lineární změna s výdrží 4 hodiny na teplotě	při 1200 °C max. 3 %	při 1400 °C max. 3 %
Chemické složení vláken	53 - 55 % SiO ₂ 45 - 47 % Al ₂ O ₃ + ZrO ₂	46 - 48 % SiO ₂ 52 - 54 % Al ₂ O ₃ + ZrO ₂

Tepelná vodivost

Metoda topného drátu (křížové uspořádání): λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹) podle ČSN EN 993 - 14				
Teplota: °C	STANDARD 250 kg.m ⁻³	STANDARD 300 kg.m ⁻³	SUPER 300 kg.m ⁻³	SUPER 400 kg.m ⁻³
200	0,086	0,093	0,090	0,095
400	0,118	0,119	0,112	0,119
600	0,167	0,158	0,147	0,159
800	0,246	0,222	0,207	0,211
1000	0,339	0,302	0,283	0,301
1100	0,413	0,330	0,315	0,325

Metoda DFI 023: λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)		
Sibra STANDARD	Objemová hmotnost kg.m ⁻³	
Teplota: °C	300 kg.m ⁻³	400 kg.m ⁻³
260	0,083	0,097
530	0,120	0,123
670	0,142	0,140

Rozměry

	Sibra STANDARD	Sibra SUPER
Rozměry	1000 x 500 mm 1200 x 1000 mm	
Tloušťka	7, 10, 13, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80 a 100 mm	
Objemová hmotnost	250, 300, 400 kg.m ⁻³	

Pozn.: Desky je možno dále dodat ve formě pruhů či výřezů různých tvarů.

Typická aplikace

Vnitřní a vnější obklady pecí
Clony proti sálavému teplu a ohni
Vysokoteplotní dělicí stěny
Podpěry infrazářičů

6

Bild 4 enthält die empfohlenen maximalen Elementoberflächenbelastungen. Die Werte gelten für folgende Auslegungsbedingungen:

Element a
Draht- und Bandelement in Rillen

Element b
Drahteillement auf Keramikrohr

Elementformen a) und b): Drahtdurchmesser wenigstens 3 mm. Banddicke wenigstens 2 mm.

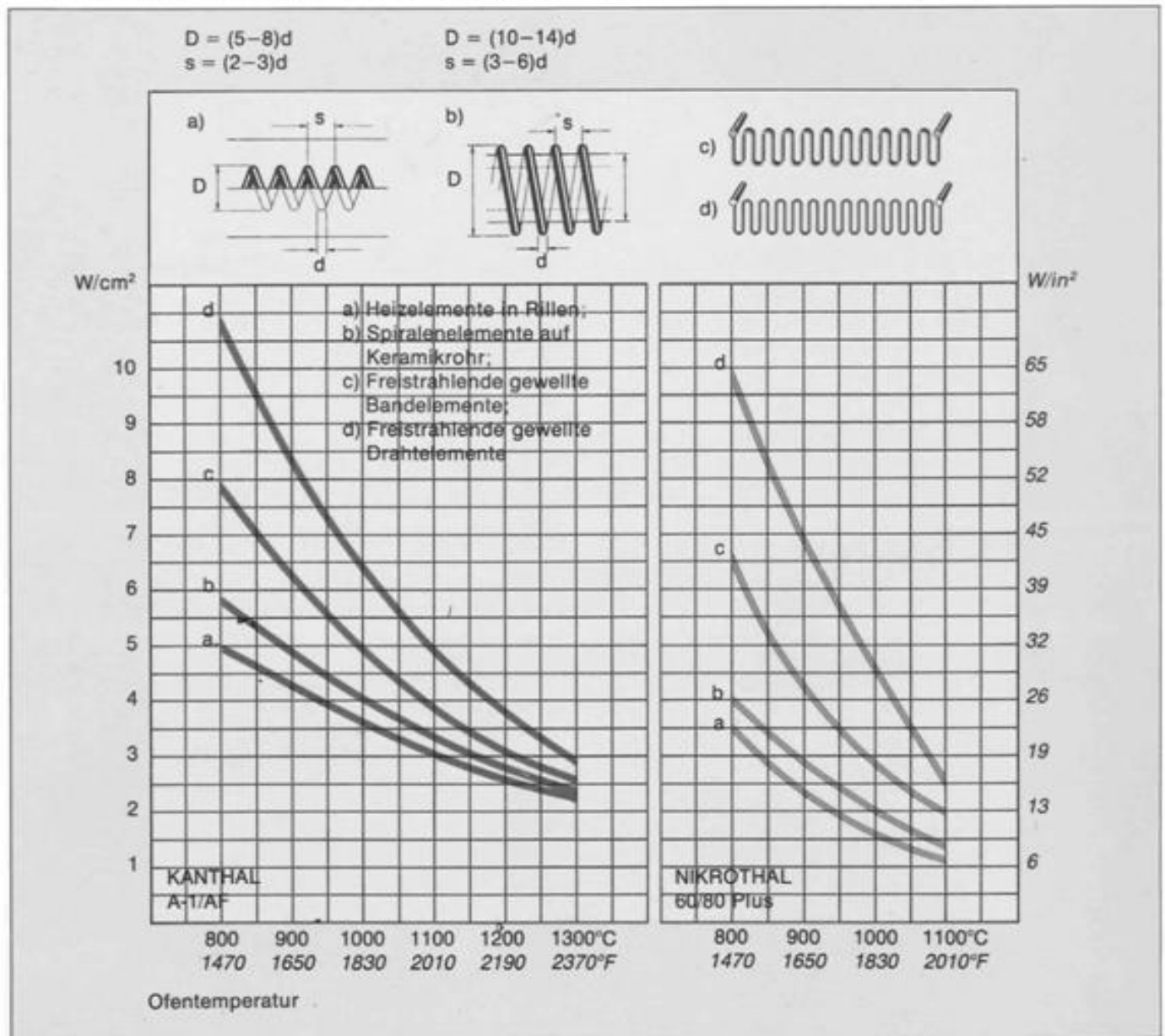
Elementformen c) und d): Drahtdurchmesser wenigstens 5 mm. Banddicke wenigstens 2,5 mm. Steigung wenigstens 50 mm bei maximaler Schlingenlänge und maximaler Oberflächenbelastung.

Empfohlene maximale Schlingenlänge:		
T_F	$\leq 900^\circ\text{C}$ 1650°F	400 mm 15,8 in
	1000°C 1830°F	350 mm 13,8 in
	1100°C 2010°F	300 mm 11,8 in
	1200°C 2190°F	250 mm 9,8 in
	1300°C 2370°F	150 mm 5,9 in

Für kleinere Drahtdurchmesser und Banddicken müssen geringere Oberflächenbelastungen und kürzere Schlingenlängen gewählt werden, wenn eine Elementverformung und demzufolge eine kürzere Elementlebensdauer vermieden werden soll.

Anmerkung: Das Bild gilt für Thyristorregelungen. Bei Ein-Aus-Regelung sollten etwas kleinere Oberflächenbelastungen gewählt werden.

Bild 4. Empfohlene maximale Oberflächenbelastungen für KANTHAL- und NIKROTHAL-Legierungen in Industrieöfen



Draht mm

12,0–1,0 mm Ø

Spezifischer elektrischer Wider-

stand, $\Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$ 1,45

Dichte, g cm^{-3} 7,1

$$\text{cm}^2/\Omega = \frac{I^2 C_1}{P}$$

I = Stromstärke

C_1 = Temperaturfaktor

P = Oberflächenbelastung,
W/cm²

Den Widerstand bei Betriebstemperatur erhält man durch Multiplikation mit nachstehenden Faktoren C_1 :

°C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
C_1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,02	1,02	1,03	1,03	1,04	1,04	1,04	1,04	1,05

10

Durchmesser mm	Widerstand pro Meter Ω/m 20°C	cm^2/Ω 20°C	Gewicht pro Meter g/m	Oberfläche pro Meter cm^2/m	Querschnitt mm^2	Durchmesser mm
12,0	0,0128	29400	803	377	113	12,0
10,0	0,0185	17000	558	314	78,5	10,0
9,5	0,0205	14600	503	298	70,9	9,5
8,25	0,0271	9560	380	259	53,5	8,25
8,0	0,0288	8710	357	251	50,3	8,0
7,5	0,0328	7180	314	236	44,2	7,5
7,0	0,0377	5840	273	220	38,5	7,0
6,5	0,0437	4670	236	204	33,2	6,5
6,0	0,0513	3680	201	188	28,3	6,0
5,5	0,0610	2830	169	173	23,8	5,5
5,0	0,0738	2130	139	157	19,6	5,0
4,75	0,0818	1820	126	149	17,7	4,75
4,5	0,0912	1550	113	141	15,9	4,5
4,25	0,102	1310	101	134	14,2	4,25
4,0	0,115	1090	89,2	126	12,6	4,0
3,75	0,131	897	78,4	118	11,0	3,75
3,5	0,151	730	68,3	110	9,62	3,5
3,25	0,175	584	58,9	102	8,30	3,25
3,0	0,205	459	50,2	94,2	7,07	3,0
2,75	0,244	354	42,2	86,4	5,94	2,75
2,5	0,295	266	34,9	78,5	4,91	2,5
2,25	0,365	194	28,2	70,7	3,98	2,25
2,0	0,462	136	22,3	62,8	3,14	2,0
1,8	0,570	99,2	18,1	56,5	2,54	1,8
1,7	0,639	83,6	16,1	53,4	2,27	1,7
1,6	0,721	69,7	14,3	50,3	2,01	1,6
1,5	0,821	57,4	12,5	47,1	1,77	1,5
1,4	0,942	46,7	10,9	44,0	1,54	1,4
1,3	1,09	37,4	9,42	40,8	1,33	1,3
1,2	1,28	29,4	8,03	37,7	1,13	1,2
1,1	1,53	22,6	6,75	34,6	0,950	1,1
1,0	1,85	17,0	5,58	31,4	0,785	1,0

Lieferbare Standardabmessungen erfahren Sie von der für Ihren Verkaufsbereich zuständigen Kanthal-Tochtergesellschaft/Vertretung oder von Kanthal, Schweden.