



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## TEPELNÝ VÝPOČET V NÁVRHU ODPOROVÝCH A INDUKČNÍCH ZAŘÍZENÍ

THERMAL CALCULATION IN DESIGN OF RESISTANCE AND INDUCTION DEVICES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vít Krčál

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ilona Lázničková, Ph.D.

BRNO 2016



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Vít Krčál

**ID:** 161718

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2015/16

## NÁZEV TÉMATU:

### Tepelný výpočet v návrhu odporových a indukčních zařízení

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Základní pojmy z oblasti elektrotepelné techniky.
2. Odporová a indukční zařízení.
3. Základy tepelného výpočtu odporových a indukčních zařízení.
4. Tepelný výpočet odporové kelímkové pece.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 8.2.2016

**Termín odevzdání:** 24.5.2016

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Ilona Lázníčková, Ph.D.

**Konzultant bakalářské práce:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., předseda oborové rady**

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Bibliografická citace práce**

KRČÁL, V. *Tepelný výpočet v návrhu odporových a indukčních zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 63 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ilona Lázničková, Ph.D.

## **Prohlášení**

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí práce doc. Ing. Iloň Lázničkové, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá tepelným výpočtem elektrotepelného zařízení a teorií s výpočtem spojenou. Vyloženy jsou vybrané partie z elektrotepelné techniky, na které navazuje výpočet v návrhu odporové kelímkové pece a jeho automatizace pomocí počítačového programu.

Teoretická část práce se nejprve zabývá způsoby sdílení tepla a jejich matematickým popisem. Dále je v práci popsán vznik tepla v odporových a indukčních elektrotepelných zařízeních a uvedeny jsou aplikace těchto typů ohřevu.

Hlavní část práce se zaměřuje na tepelný výpočet odporové kelímkové pece na tavení hliníku. Výpočet se vztahuje na válcový model pece se známou konstrukcí a řeší především tepelné ztráty, elektrický příkon, účinnost a návrh topných článků. Výpočet je proveden pouze obecně a následně je automatizován v aplikaci Microsoft Office Excel<sup>®</sup>. Výpočetní program, který je součástí práce, umožňuje uživateli měnit vstupní parametry a sledovat tak změny ve výsledcích výpočtu. V poslední kapitole je uveden příklad výpočtu pro konkrétní číselné zadání.

Hlavním výsledkem práce je automatizování výpočtu, které může ušetřit čas při počítání a navrhování kelímkové pece.

## **Klíčová slova**

tepelný výpočet; kelímková pec; sdílení tepla; odporový ohřev; indukční ohřev; topné články; tepelné ztráty;

## **Abstract**

This bachelor's thesis focuses on thermal calculation of electric heating device and related theory. Selected topics in electric heating technology are explained, followed by the calculation in design of a crucible furnace and its automation using a computer program.

The theoretical part first deals with the heat transfer mechanisms and their mathematical description. Further on, the thesis describes how heat is created in resistance and induction heating devices and mentions applications of these types of heating.

The main part of the thesis focuses on the thermal calculation of the resistance crucible furnace for aluminium melting. The calculation relates to a cylinder-shaped model of the furnace with determined structure and deals mostly with heat loss, electric power input, thermal efficiency and design of heating elements. The calculation is achieved only in general and it is subsequently automated in Microsoft Office Excel<sup>®</sup> application. The computer program, which is also a part of the thesis, allows user to change input parameters and see how it affects results of the calculation. In the last chapter, an example of calculation for specific numeric data is presented.

The main goal of the thesis is to automate the calculation. That can save some time while calculating and designing a crucible furnace.

## **Key words**

thermal calculation; crucible furnace; heat transfer; resistive heating; induction heating; heating elements; heat loss;

# OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>11</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>13</b>
<b>2 ZÁKLADNÍ POJMY Z OBLASTI ELEKTROTEPELNÉ TECHNIKY .....</b>	<b>14</b>
2.1 Základní pojmy a veličiny .....	14
2.2 Způsoby sdílení tepla .....	14
2.2.1 <i>Sdílení tepla vedením.....</i>	<i>15</i>
2.2.2 <i>Sdílení tepla prouděním.....</i>	<i>15</i>
2.2.3 <i>Sdílení tepla sáláním .....</i>	<i>16</i>
2.2.4 <i>Součinitel přestupu tepla.....</i>	<i>18</i>
2.3 Kalorimetrické výpočty .....	18
<b>3 ODPOROVÁ TEPELNÁ ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>20</b>
3.1 Vznik tepla.....	20
3.2 Přímý odporový ohřev .....	20
3.2.1 <i>Ohřev dlouhých kovových tyčí, drátů, pásů apod.....</i>	<i>21</i>
3.2.2 <i>Pece na výrobu grafitu a karbidu křemíku.....</i>	<i>21</i>
3.2.3 <i>Přímý odporový ohřev skla.....</i>	<i>21</i>
3.2.4 <i>Solné lázně.....</i>	<i>22</i>
3.2.5 <i>Elektrodový ohřev vody.....</i>	<i>22</i>
3.3 Nepřímý odporový ohřev .....	22
3.3.1 <i>Odporové pece se stabilní vsázkou.....</i>	<i>23</i>
3.3.2 <i>Odporové pece průběžné .....</i>	<i>24</i>
3.4 Materiály a součásti odporových pecí s nepřímým ohřevem.....	25
3.4.1 <i>Základní části elektrických pecí .....</i>	<i>25</i>
3.4.2 <i>Materiály pro topné články .....</i>	<i>26</i>
3.4.3 <i>Konstrukce topných článků.....</i>	<i>27</i>
<b>4 INDUKČNÍ TEPELNÁ ZAŘÍZENÍ.....</b>	<b>28</b>
4.1 Základní poznatky o indukčním teple.....	28
4.2 Základní provedení indukčních zařízení .....	28
4.2.1 <i>Indukční pece kelímkové.....</i>	<i>29</i>
4.2.2 <i>Indukční pece kanálkové.....</i>	<i>30</i>
4.2.3 <i>Indukční ohřevy pro tváření .....</i>	<i>31</i>
4.2.4 <i>Indukční povrchový ohřev .....</i>	<i>31</i>
<b>5 ZÁKLADY TEPELNÝCH VÝPOČTŮ PECÍ.....</b>	<b>32</b>
5.1 Postup návrhu odporové pece .....	32
5.2 Výpočet doby ohřevu vsázky.....	33
5.2.1 <i>Tepelná velikost vsázky.....</i>	<i>33</i>
5.2.2 <i>Tepelný režim pece .....</i>	<i>33</i>
5.3 Výpočet příkonu pece .....	34
5.4 Výpočet topných článků .....	35
5.5 Výpočet indukčních pecí .....	36

<b>6</b>	<b>TEPELNÝ VÝPOČET ODPOROVÉ KELÍMKOVÉ PECE .....</b>	<b>37</b>
6.1	Definice problému .....	37
6.2	Určení potřebného tepla a teploty spirál .....	38
6.3	Výpočet tepelných ztrát a celkového příkonu.....	40
6.3.1	<i>Ztráty pláštěm.....</i>	<i>40</i>
6.3.2	<i>Ztráty dnem a víkem .....</i>	<i>42</i>
6.3.3	<i>Celkový příkon.....</i>	<i>44</i>
6.4	Návrh topného systému .....	44
6.5	Akumulované teplo, doba náběhu a tepelná účinnost.....	46
<b>7</b>	<b>VÝPOČETNÍ PROGRAM .....</b>	<b>49</b>
<b>8</b>	<b>PŘÍKLAD VÝPOČTU .....</b>	<b>51</b>
8.1	Zadání - vstupní parametry .....	51
8.2	Vybrané výstupy .....	52
8.3	Srovnání výpočtu s parametry katalogové pece.....	53
<b>9</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>55</b>
	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>56</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>58</b>
<b>PŘÍLOHA A</b>	<b>ZJEDNODUŠENÝ NÁKRES KELÍMKOVÉ PECE.....</b>	<b>59</b>
<b>PŘÍLOHA B</b>	<b>POVRCHOVÉ ZATÍŽENÍ DRÁTŮ KANTHAL .....</b>	<b>60</b>
<b>PŘÍLOHA C</b>	<b>PARAMETRY TOPNÉ SPIRÁLY KANTHAL.....</b>	<b>61</b>
<b>PŘÍLOHA D</b>	<b>KATALOGOVÝ LIST DRÁTŮ KANTHAL .....</b>	<b>62</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2-1: Rozdělení energie ve spektru černého tělesa [18] .....	17
Obrázek 3-1: Příklad komorové pece [9] .....	23
Obrázek 3-2: Schéma multifunkční komorové pece [21].....	23
Obrázek 3-3: Schéma pásové pece [3] .....	24
Obrázek 4-1: Schéma indukční kelímkové pece [8].....	29
Obrázek 4-2: Indukční kanálková pec [8] .....	30
Obrázek 7-1: Výpočetní program .....	50
Obrázek A-1: Zjednodušený nákres kelímkové pece v řezu .....	59
Obrázek B-1: Závislost zvoleného povrchového zatížení na teplotě pece [20] .....	60
Obrázek C-1: Topná spirála s doporučenými rozsahy parametrů [11].....	61

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 2-1: Hodnoty měrných tepelných kapacit pro některé materiály [8].....	19
Tabulka 8-1: Výchozí hodnoty pro výpočet.....	51
Tabulka 8-2: Zvolené možnosti přepínačů.....	52
Tabulka 8-3: Vlastnosti částí pece.....	52
Tabulka 8-4: Výstupní hodnoty výpočtu.....	53
Tabulka 8-5: Srovnání parametrů vypočítané pece a pece z katalogu.....	54
Tabulka D-1: Řada nominálních průřezů drátů Kanthal A-1 a APM s jejich dalšími vlastnostmi [12].....	62

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

symbol	název	jednotka
$A$	poměrná pohltivost	-
$B$	poměrná odrazivost	-
$Bi$	Biotovo kritérium	-
$C$	poměrná propustnost	-
$D$	vnější průměr spirály	m
$I$	elektrický proud	A
$L$	délka	m
$M$	hustota zářivého toku	$W.m^{-2}$
$M_\lambda$	spektrální hustota zářivého toku	$W.m^{-2}$
$N$	počet	-
$O$	obvod	m
$P$	výkon, příkon	W
$P_{zj,r}$	jednotkové tepelné ztráty rovinnou stěnou	$W.m^{-2}$
$P_{zj,v}$	jednotkové tepelné ztráty válcovou stěnou	$W.m^{-1}$
$Q$	teplo	J
$R$	elektrický odpor	$\Omega$
$R_r$	tepelný odpor rovinné stěny	$m^2.K.W^{-1}$
$R_v$	tepelný odpor válcové stěny	$m.K.W^{-1}$
$S$	obsah plochy	$m^2$
$Sk$	Starkovo kritérium	-
$S_n$	normálová plocha	$m^2$
$T$	termodynamická teplota	K
$U$	elektrické napětí	V
$V$	objem	$m^3$
$c$	rychlost světla ve vakuu	$m.s^{-1}$
$c$	součinitel vyzařování	$W.m^{-2}.K^{-4}$
$c, c_q$	měrná tepelná kapacita	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
$c_{qs}$	skupenské teplo	$J.kg^{-1}$
$c_T$	koeficient přepočtu rezistivity podle teploty	-
$d$	průměr	m
$f$	frekvence	Hz
grad $T$	teplotní gradient	$K.m^{-1}$
$h$	Planckova konstanta	J.s
$h$	výška	m
$h_k\%$	navýšení kelímku nad hladinu vsázky	%

$k$	Boltzmannova konstanta	$J.K^{-1}$
$k_B$	součinitel bezpečnosti	-
$k_{pln}$	koeficient plnění	-
$l$	délka	m
$m$	hmotnost	kg
$n$	počet	-
$p$	povrchové zatížení	$W.m^{-2}$
$p_{z\%}$	procentní odhad tepelných ztrát	%
$q$	hustota tepelného toku	$W.m^{-2}$
$q_{z\%}$	procentní odhad tepelných ztrát	%
$r$	poloměr	m
$s$	charakteristický rozměr vsázky	m
$s$	stoupání spirály	m
$s$	tloušťka	m
$t$	čas	s
$\Delta T$	teplotní spád, teplotní rozdíl	K
$\Phi$	tepelný tok	W
$\alpha$	součinitel přestupu tepla	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$\alpha$	teplotní součinitel odporu	$K^{-1}$
$\gamma$	konduktivita	$S.m^{-1}$
$\delta$	hloubka vniku	m
$\varepsilon$	emisivita, stupeň černosti	-
$\eta$	účinnost	-
$\vartheta$	teplota v Celsiově stupnici	$^{\circ}C$
$\lambda$	tepelná vodivost	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$\lambda$	vlnová délka	m
$\mu_r$	relativní permeabilita	-
$\zeta$	poměr průřezu a obvodu	m
$\pi$	Ludolfovo číslo	-
$\rho$	rezistivita	$\Omega.m$
$\rho_h$	hustota	$kg.m^{-3}$
$\sigma_{\varepsilon}$	součinitel sálání černého tělesa	$W.m^{-2}.K^{-4}$
$\sigma_{SB}$	Stefanova–Boltzmannova konstanta	$W.m^{-2}.K^{-4}$

# 1 ÚVOD

Ve většině elektrotechnických a energetických odvětvích reprezentuje teplo především ztráty v přenosu elektrické energie, v oboru elektrotepelné techniky je však cílovým produktem. V procesech výroby energie je vztah výchozí a výsledné formy energie obrácen, neboť je snahou z tepla získávat co nejefektivněji ušlechtilou energii elektrickou. Ta se díky svým jedinečným vlastnostem přenáší do nejrůznějších spotřebičů. Značnou část elektrické energie odebírají i zařízení elektrotepelná, ve kterých se elektřina mění opět v teplo.

Přeměna elektrické energie na teplo se uskutečňuje v souvislosti s několika fyzikálními principy. Podle způsobu vzniku tepla v zařízení lze rozlišovat ohřevy odporové, indukční, obloukové, dielektrické, mikrovlnné, infračervené, elektronové, plazmové a laserové. První dva zmíněné typy ohřevu, tedy ohřevy odporové a indukční, jsou také předmětem této práce. Odporová elektrotepelná zařízení jsou historicky nejstarší, avšak dodnes se díky svým přednostem používají v mnoha aplikacích. Indukční elektrotepelná zařízení představují technologicky pokročilejší a perspektivnější způsob ohřevu. Indukční teplo se výhodně používá pro svoji čistotu a rychlost. Jednotlivé typy ohřevů se dají různě kombinovat a využívat tak výhody každého z nich.

Elektrické teplo má oproti palivovému nespočet výhod. Jde o pohotovost, výrazně lepší možnosti regulace a automatizace, přesnost, kvalitu výrobků, reprodukovatelnost procesů, efektivitu práce a také zlepšení pracovního a životního prostředí. Bez elektrického tepla by mnoho výrobních technologií nebylo možno realizovat. Mimo technologického užití v různých oblastech průmyslu se elektrický ohřev uplatňuje v domácnostech za účelem vytápění nebo ohřevu vody.

Tepelný výpočet je základním východiskem v návrhu elektrotepelného zařízení. Skládá se zejména z určení potřebného množství tepla, tepelných ztrát, příkonu, účinnosti, doby ohřevu atp. Na rozdíl od výpočtu elektrického, který se u jednotlivých typů zařízení liší podle způsobu elektrotepelné přeměny, je tepelný výpočet podobný pro všechny druhy ohřevu. V této práci je tepelný výpočet proveden pro jednu z aplikací elektrického odporového ohřevu – tavicí kelímkovou pec.

Následující text se zabývá vybranými partiemi z elektrotepelné techniky, na které navazuje tepelný výpočet odporového zařízení. Vyloženy jsou základní poznatky z teorie daného oboru, které umožňují porozumět principům vzniku tepla a jeho šíření při technologických ohřevech. Pro utvoření nadhledu a přiblížení teorie praxi jsou v textu popsány různé aplikace odporového a indukčního ohřevu. Vypracován je také úvod do tepelných výpočtů elektrických pecí, který tvoří podklad pro následný výpočet v návrhu odporové kelímkové pece. Vlastní výpočet se vztahuje na model pece se známou konstrukcí a řeší především tepelné ztráty, elektrický příkon, účinnost a návrh topných článků. Výpočet je v textu popsán s uvedením všech použitých vztahů a také je automatizován pomocí aplikace Microsoft Office Excel<sup>®</sup>. Výsledný program umožňuje uživateli libovolně měnit vstupní parametry podle potřeb konkrétního zadání a sledovat tak změny ve výsledcích výpočtu.

## 2 Základní pojmy z oblasti elektrotepelné techniky

Pro lepší porozumění technologickým postupům a principům zařízení je třeba se seznámit alespoň se základy teorie elektrotepelné techniky [3]. Na základních poznátcích lze stavět při výpočtech navrhovaných zařízení i při ověřování existujících zařízení. V této kapitole budou uvedeny vybrané veličiny používané při popisu tepelných výpočtů, popsány budou způsoby sdílení tepla a kalorimetrické výpočty.

### 2.1 Základní pojmy a veličiny

**Teplo**  $Q$  je termodynamická veličina vyjadřující změnu vnitřní energie soustavy [8], pokud tato soustava nekoná práci a neprobíhají v ní chemické reakce a změny skupenství. Je to část vnitřní energie, která může být sdílena s okolím. Teplo není stavovou veličinou, vztahuje se vždy k dynamické interakci s okolím.

**Teplota** je stavová veličina úměrná vnitřní energii soustavy. Základní teplotní stupnicí je termodynamická stupnice ( $[T] = \text{K}$ ). Běžně se používá Celsiova stupnice ( $[\vartheta] = ^\circ\text{C}$ ). Teplotní rozdíl je číselně shodný, vzájemný přepočet hodnot teplot je

$$T = (\{\vartheta\} + 273,15) \text{ K.}$$

**Teplotní pole** [6] je množina okamžitých teplot všech bodů zkoumané části prostoru. Je spojitě a skalární. Plochy zahrnující body stejné teploty jsou **izotermy**.

**Teplotní gradient**  $\text{grad } T$ ,  $[\text{grad } T] = \text{K} \cdot \text{m}^{-1}$ , je vektor kolmý k izotermě [6] a určuje směr růstu teploty. Teplo se šíří vždy proti směru teplotního gradientu.

**Tepelný tok** (tepelný výkon)  $\Phi$ ,  $[\Phi] = \text{W}$ , představuje přenesené množství tepla za čas.

**Vektor hustoty tepelného toku**  $\mathbf{q}$ ,  $[q] = \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ , je tepelný tok vztahovaný na normálovou plochu.

$$\mathbf{q} = \frac{d\Phi}{dS_n}$$

**Tepelná vodivost**  $\lambda$ ,  $[\lambda] = \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , je materiálová vlastnost [3] a určuje, jak snadno se teplo šíří uvnitř látek.

**Součinitel přestupu tepla**  $\alpha$ ,  $[\alpha] = \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , je fyzikální veličina používaná při výpočtech sdílení tepla sáláním a prouděním. Většinou jde o přestup tepla rozhraním dvou látek různého skupenství. Definován je jako podíl hustoty tepelného toku procházejícího rozhraním a tepelného rozdílu obou látek. Bližší popis je uveden v kap. 2.2.4.

$$\alpha = \frac{q}{\Delta T}$$

### 2.2 Způsoby sdílení tepla

Tepelná energie se mezi tělesy předává za účelem vytvoření stabilního stavu – tepelné rovnováhy [2]. Předávání tepla se uskutečňuje třemi fyzikálními principy, a to vedením, prouděním a sáláním. V praxi se většinou uplatňují tyto principy zároveň.

### 2.2.1 Sdílení tepla vedením

Přenos tepla vedením, neboli kondukcí, probíhá běžně ve všech třech skupenstvích, nejvýrazněji však v pevných látkách. Teplo si vyměňují částice ve formě střední kinetické energie při vzájemných srážkách. Částice tělesa s vyšší teplotou mají vyšší hodnotu střední kinetické energie a při vzájemném styku obou těles se srážejí s částicemi o nižší střední kinetické energii. Tyto částice se rozkmitají s větší energií a šíří teplo dál do chladnější části tělesa. Nedochází však k přesunu hmoty.

Velikost převedeného tepla závisí na počtu částic schopných přenést vnitřní energii a na pravděpodobnosti vzniku srážky. Pro různé látky je schopnost vést teplo reprezentována tepelnou vodivostí  $\lambda$ . Je to materiálová vlastnost závislá na teplotě. Vztah mezi hustotou tepelného toku  $q$  a teplotním gradientem vyjadřuje Fourierův zákon pro vedení tepla, který lze psát ve tvaru [3]

$$q = -\lambda \cdot \text{grad} T. \quad (2.1)$$

V praxi se uvažuje vedení tepla rovinnou či válcovou stěnou o určité tloušťce a povrchových teplotách na opačných stranách stěny. Pomocí Fourierova zákona se počítají ztráty izolací pece, teploty na rozhraních stěn nebo ohřev materiálů prostupem tepla.

### 2.2.2 Sdílení tepla prouděním

Proudění (konvekce) je způsob přenosu tepla spjatý se přenosem hmoty [2]. Sdílet teplo prouděním jsou schopny hlavně tekutiny – kapaliny a plyny. Proudění probíhá buď samovolně v rámci vyrovnávání teplot, nebo nuceně vnějším působením (umělá cirkulace vzduchu). Rozlišuje se tedy:

- přirozená konvekce,
- nucená konvekce.

Matematicky se popisuje konvekce Newtonovým vztahem [3]

$$Q = \alpha \cdot S \cdot \Delta T \cdot t, \quad (2.2)$$

kde  $Q$  je teplo přenesené prouděním,  $[Q] = \text{J}$ ,  
 $\alpha$  součinitel přestupu tepla,  $[\alpha] = \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  
 $S$  obsah přestupové plochy,  $[S] = \text{m}^2$ ,  
 $\Delta T$  teplotní rozdíl,  $[\Delta T] = \text{K}$ ,  
 $t$  čas,  $[t] = \text{s}$ .

U elektrických pecí má konvekce význam především při nižších provozních teplotách, kdy se počítají ztráty ochlazováním vnějším povrchem [6]. U vyšších teplot se uplatňuje více radiace. Pro účinnější ochlazování částí pece se zavádí umělá cirkulace ovzduší (např. ofukování ventilátorem).

### 2.2.3 Sdílení tepla sáláním

Sálání (radiace) je zprostředkováno elektromagnetickými vlnami, které vyzařuje každé reálné těleso. Emitované vlnění se šíří prostorem a je v určité míře propouštěno, odraženo nebo pohlcováno dalšími tělesy. Zářivý tok energie dopadající na těleso lze tedy rozdělit na tři části, jejichž poměrné hodnoty charakterizují určité těleso. Zavedeny jsou relativní veličiny [2]

- poměrná pohltivost (absorpce)  $A$ ,
- poměrná odrazivost (reflexe)  $B$ ,
- poměrná propustnost  $C$ .

Podle zákona zachování energie musí platit

$$A + B + C = 1. \quad (2.3)$$

Při absorbování se energie elektromagnetického záření mění na teplo. Tělesa, u kterých převažuje emise nad absorpcí, se ochlazují. Naopak při převaze absorpce se tělesa zahřívají.

Pro snadnější popis zákonů záření se používá fyzikální abstrakce, která představuje těleso s nulovou odrazivostí a maximální pohltivostí - absolutně černé těleso. Množství energie vyzářené absolutně černým tělesem závisí pouze na jeho termodynamické teplotě, a to na její čtvrté mocnině. Tuto skutečnost vyjadřuje Stefanův–Boltzmannův zákon:

$$M = \sigma_{SB} \cdot T^4, \quad (2.4)$$

kde  $M$  je hustota zářivého toku,  $[M] = \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  
 $\sigma_{SB}$  Stefanova–Boltzmannova konstanta,  $\sigma_{SB} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ .

Rozložení vyzářené energie po spektru však není rovnoměrné. Závislost spektrální hustoty vyzařování  $M_\lambda$  a vlnové délky záření  $\lambda$  při určité teplotě  $T$  odvodil Max Planck na základě kvantové hypotézy. Planckův vyzařovací zákon lze napsat ve tvaru [22]

$$M_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (2.5)$$

kde  $h$  je Planckova konstanta,  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ,  
 $k$  Boltzmannova konstanta,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  
 $c$  rychlost světla ve vakuu,  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  
 $\lambda$  vlnová délka,  $[\lambda] = \text{m}$ .

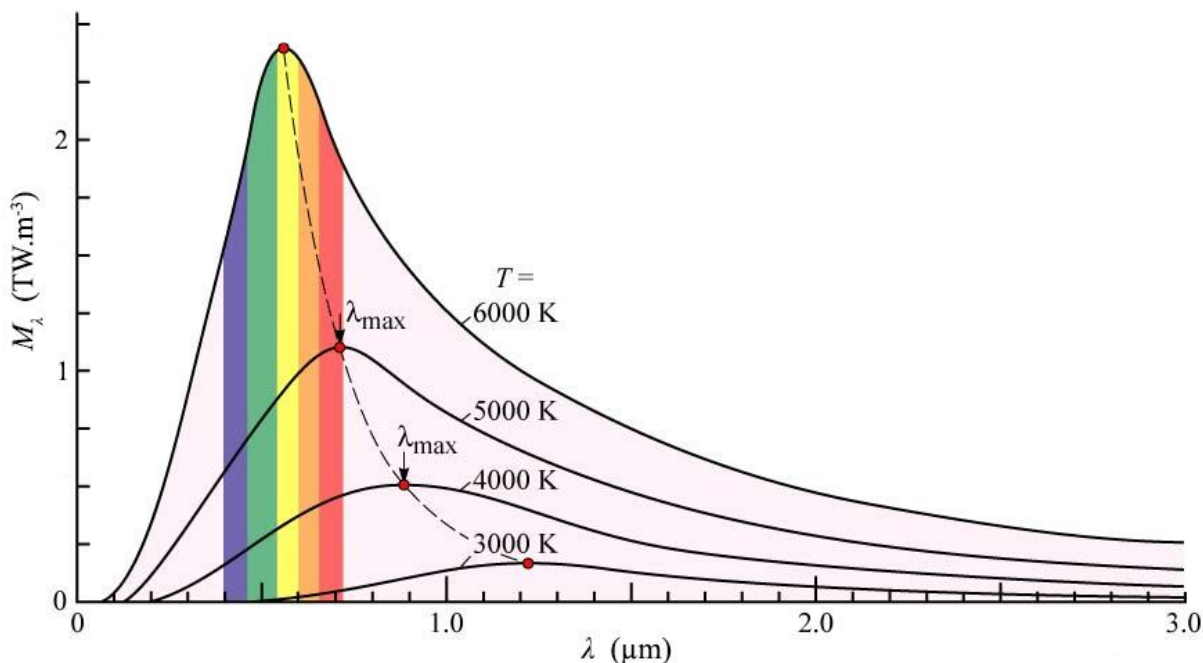
Maximum spektrální hustoty vyzařování se posouvá při stoupající teplotě do oblasti spektra s kratšími vlnovými délkami. Toto tvrzení se označuje jako Wienův posunovací zákon. Maximální vyzařování nastává na vlnové délce

$$\lambda_m = \frac{2897,79}{T} \cdot 10^{-6}. \quad (2.6)$$

Spektrální vyzařování je znázorněno na obrázku 2-1 [18]. Tvar křivek vyzařování pro různé teploty se řídí Planckovým zákonem. Jejich maxima se s rostoucí teplotou posouvají do oblasti



kratších vln podle Wienova zákona. Úhrnnou zářivost lze podle Stefanova–Boltzmannova zákona interpretovat jako obsah plochy pod vyzařovací křivkou. Z infinitezimálního počtu plyne, že hodnota vlnové délky, na níž nastává maximum vyzařování, je výsledkem první derivace Planckova vztahu. Úhrnná zářivost je pak integrál spektrální zářivosti v intervalu od nuly do nekonečna.



Obrázek 2-1: Rozdělení energie ve spektru černého tělesa [18]

Při přechodu vlnění z jednoho prostředí do druhého nastává mimo odraz také lom, který bývá popisován Snellovým zákonem, dobře známým z geometrické optiky. Dalším poznatkem je Lambertův zákon, podle nějž se při dopadu záření na rovinnou plochu pod určitým úhlem uplatňuje v předávání energie pouze normálová složka záření.

Pro úplnost zákonů sálání je třeba uvést Kirchhoffův zákon tepelného vyzařování. Dosud bylo pojednáváno o absolutně černém tělese, tedy o nereálném modelu vyhovujícím matematickým a fyzikálním popisům. Reálná tělesa, která mají poměrnou pohltivost menší než 1, se nazývají šedá. Relativní pohltivost se označuje také jako stupeň černosti, či součinitel emisivity  $\varepsilon$

$$A_s = \varepsilon_s \wedge \varepsilon_s \in (0;1) . \quad (2.7)$$

Úhrnná i spektrální hustota zářivého toku je potom menší než u absolutně černého tělesa a platí [8]:

$$M_s = A_s \cdot M_{ACT} , \quad (2.8)$$

$$M_{s,\lambda} = A_{s,\lambda} \cdot M_{ACT,\lambda} . \quad (2.9)$$

U většiny pevných látek je stupeň černosti stejný v celém spektru.

## 2.2.4 Součinitel přestupu tepla

O přestupu tepla se podle [20] hovoří v souvislosti s následujícími dvěma způsoby sdílení:

- čisté proudění tekutiny
- sálání

Celkový součinitel přestupu tepla lze pak brát jako součet dílčích součinitelů pro proudění ( $\alpha_p$ ) a sálání ( $\alpha_s$ )

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_s . \quad (2.10)$$

Podíly jednotlivých složek se mění s teplotou. Při nižších teplotách (cca do 150 °C) je větší vliv konvekce, při vyšších teplotách potom narůstá převaha vlivu radiace, až se  $\alpha_p$  zanedbává [20].

Součinitel přestupu tepla při proudění není materiálovou konstantou, ale velice složitou funkcí mnoha veličin, které přestup tepla ovlivňují. Závisí na okolních podmínkách, fyzikálních vlastnostech kapaliny a na konkrétním způsobu proudění. Pro teoretické výpočty se používá teorie podobnosti. Může nabývat značně proměnných hodnot, jejichž orientační hodnoty lze najít v tabulkách. Často se určuje experimentálně, kdy se z naměřených veličin na modelu dopočítává.

U sálavého přestupu lze vypočítat součinitel přestupu tepla snadněji. Při vyšších teplotách (více než 500 °C) lze pro daný rozsah teplot dosti přesně vypočítat  $\alpha_s$ . Při zanedbání konvekční složky  $\alpha_p$  lze považovat sálavou složku  $\alpha_s$  za výsledný součinitel přestupu  $\alpha$ . Porovnáním Newtonova a Stefanova-Boltzmannova zákona vznikne vztah [20]

$$\alpha = \alpha_s = \frac{\sigma_{\varepsilon} \cdot \varepsilon \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{T_1 - T_2} , \quad (2.11)$$

kde  $\sigma_{\varepsilon}$  je součinitel sálání černého tělesa, který představuje číselnou hodnotu Stefanovy-Boltzmannovy konstanty, tedy  $\sigma_{\varepsilon} = 5,67 \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ , činitel  $10^{-8}$  se vyjadřuje ve zlomku teploty  $10^{-8} = 1/100^4$ .

## 2.3 Kalorimetrické výpočty

Kalorimetrické výpočty jsou výchozí úlohou při navrhování a počítání elektrotepelných zařízení. Určují množství tepla potřebného pro ohřátí tělesa o určitý teplotní rozdíl.

Hlavním faktorem výpočtu je materiálová konstanta, která odpovídá schopnosti látky akumulovat teplo. Zavádí se měrná tepelná kapacita  $c^i$  definovaná jako množství tepla potřebného k ohřátí 1 kilogramu látky o 1 teplotní stupeň [8]. Měrná tepelná kapacita se s teplotou mění, ale běžně se v určitém rozsahu teplot považuje za konstantní. V tabulce 2-1 [8] jsou hodnoty měrné tepelné kapacity pro některé materiály. Důležitá je měrná tepelná kapacita vody, jež se stala základem pro zavedení jednotky kalorie,  $1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ J}$  [2].

---

<sup>i</sup> Ve výpočetní části práce bude měrná tepelná kapacita značena symbolem  $c_q$ , aby se odlišila od součinitele záření  $c$ .

**Tabulka 2-1: Hodnoty měrných tepelných kapacit pro některé materiály [8]**

<b>látka</b>	<b><math>c</math> (kJ.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)</b>	<b>látka</b>	<b><math>c</math> (kJ.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)</b>
voda	4187	železo	450
vzduch	1003	měď	383
etanol	2460	zinek	385
led	2090	hliník	896
olej	2000	cín	227
suché dřevo	1450	olovo	129
kyslík	917	zlato	129
křemík	703	platina	133

Kalorimetrická rovnice má obecně tvar [3]

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad . \quad (2.12)$$

Za předpokladu, že teplo je do systému dodáno elektrickým příkonem  $P$  za čas  $t$  a přeměna energie probíhá s účinností  $\eta$ , lze nahradit levou stranu rovnice a výsledkem je rovnost

$$P \cdot t \cdot \eta = m \cdot c \cdot \Delta T \quad . \quad (2.13)$$

Rovnice (2.13) popisuje velmi zjednodušeně energetickou bilanci elektrotepelného zařízení. Stěžejní veličinou v rovnici je účinnost, která představuje především schopnost zařízení dodat vyrobené teplo ohřívané látce. Ve všech zařízeních se totiž určitá část tepla předává do okolí a způsobuje tak tepelné ztráty. Podrobný výpočet tepelných ztrát bude proveden v kap. 6.3.

## 3 Odporová tepelná zařízení

### 3.1 Vznik tepla

Vznik tepla v odporových elektrotepelných zařízeních se řídí podle Jouleova zákona. Množství tepla vzniklého ve vodiči o odporu  $R$ , protékaného proudem  $I$  za čas  $t$  je

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t. \quad (3.1)$$

Z pohledu částicové fyziky se jedná o srážky nosičů náboje s jinými nosiči, atomy nebo ionty krystalové mřížky. Množství srážek v elementu vodiče závisí na struktuře materiálu a na počtu nosičů náboje, jenž je úměrný elektrickému proudu [2]. Materiálové vlastnosti shrnuje rezistivita  $\rho$ . Teplota má vliv na kmitavý pohyb mřížky a ostatních částic, proto je nutné uvažovat vliv teplotního součinitele odporu  $\alpha$  na rezistivitu, respektive odpor látky. Odpor při dané teplotě  $T$  se přepočítá z hodnoty referenčního odporu [8]

$$R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T). \quad (3.2)$$

Teplotní součinitel odporu  $\alpha$ ,  $[\alpha] = \text{K}^{-1}$ , může nabývat jak kladných (kovy), tak i záporných (polovodiče) hodnot.

Podle způsobu předání tepla ohřívané látce se rozlišuje odporový ohřev na přímý a nepřímý [8]. U přímého odporového ohřevu vzniká teplo přímo v ohřívané vsázce. U nepřímého odporového ohřevu se do vsázky teplo šíří z topných článků, a to způsoby uvedenými v kapitole 2.2.

### 3.2 Přímý odporový ohřev

V zařízeních na přímý odporový ohřev vzniká teplo průchodem proudu přímo ohřívanou látkou. Vsázka tedy musí být elektricky vodivá a galvanicky se připojuje ke zdroji střídavého nebo stejnosměrného elektrického proudu [20]. Vsázku představuje buď pevná látka, nebo elektrolytická kapalina. V průběhu ohřívání se s rostoucí teplotou mění vlastnosti vsázky – především rezistivita, měrná tepelná kapacita a tepelná vodivost [2]. Zjednodušeně se dá tepelná bilance ohřevu napsat jako

$$Q = Q_u + Q_z, \quad (3.3)$$

kde  $Q$  je celkové vzniklé teplo průchodem proudu,  
 $Q_u$  užitečné teplo potřebné k ohřevu vsázky,  
 $Q_z$  ztrátové, neužitečné teplo.

Uvedená tepelná bilance je východiskem pro určení potřebného výkonu, který je v čase proměnný podle ohřívání vsázky, tedy

$$P \sim \frac{dQ}{dt}. \quad (3.4)$$

V praxi se podle [14] využívá přímý odporový ohřev pro ohřívání drátů, plechů, nýtů a různého tyčového materiálu. Ohřívání materiálů je běžně z konstrukční oceli, austenitické oceli nebo čistého železa. Další technickou aplikací jsou pece s přímým odporovým ohřevem na výrobu grafitu a karbidu křemíku. Přímý odporový ohřev lze využít i pro ohřev kapalin – elektrolytů,

do této skupiny spadá problematika tavení skla, solných lázní a elektrodového ohřevu vody. Přímý odporový ohřev má vysokou účinnost, která dosahuje až 70 – 85 %.

Příklady některých aplikací přímého odporového ohřevu jsou uvedeny a stručně popsány v následujících podkapitolách.

### **3.2.1 Ohřev dlouhých kovových tyčí, drátů, pásů apod.**

Dlouhé kovové tyče, jejichž délka je mnohonásobně větší než jejich průměr, se ohřívají přímým průchodem proudem. Princip je jednoduchý [20] – do tyče je přiváděn velký proud, který je regulován autotransfátorem. Lze odvodit, že optimální poměry nastanou při rovnosti činného odporu tyče a impedanci přívodního vedení. V praxi se tuto podmínku nedaří přesně realizovat, protože ohřívání tělesa mění s teplotou svoje vlastnosti. Řešení impedančního přizpůsobení tkví ve zvyšování napětí souhlasně s růstem odporu tyče a provádí se přepínáním vstupních odboček transformátoru. Kontakty bývají měděné a chlazené vodou a jsou přitlačovány k tyči hydraulicky či pneumaticky [8].

Nevýhodou je opakované zapínání a vypínání u ohřívání každé tyče [20], což zvyšuje nároky na dimenzování spínacího zařízení a přívodní sítě. Za účelem dosažení co největší tepelné účinnosti ohřevu jsou třeba poměrně vysoké výkony působící po kratší doby ohřevu.

### **3.2.2 Pece na výrobu grafitu a karbidu křemíku**

Výroba grafitu probíhá v tzv. Achesonových pecích [1], pojmenovaných podle vynálezce umělé syntézy grafitu E. G. Achesona. Původní výrobní proces byl prováděn jako přehřívání karbidu křemíku, kdy se při teplotě 4150 °C odpařoval křemík a zůstával uhlík ve formě grafitu. Další metoda výroby je grafitizace, podle [17] je to závěrečná fáze přeměny organické hmoty ve stabilní grafit. Některé meziproducty (např. reziduální uhlík, grafitoidní substance) jsou sice grafitu velmi podobné, avšak nemají ještě typickou strukturu grafitu.

V grafitací peci [20], která dosahuje značných rozměrů (délka až 20 metrů), se udržuje teplota okolo 2500 °C. Hmotnost vsázky přesahuje i 50 t, příkon transformátorů může být až 10 MVA. Pece pracují s přerušovaným provozem, kdy v každé peci z několika připojených probíhá jiná fáze výroby. Na výrobu 1 kg grafitu se uvádí spotřeba 4 kWh až 6 kWh.

Výroba karbidu křemíku (karborundum, SiC) probíhá v obdobných pecích jako výroba grafitu [20]. Proud se přivádí grafitovými bloky do grafitového jádra zasypaného ve směsi koksu, křemičitého písku, dřevěných pilin a chloridu sodného. V důsledku zahřívání průchodem proudem a chemických reakcí vzniká SiC asi při 1800 °C. Spotřeba elektrické energie na výrobu 1 kg karborunda je asi 8 kWh.

### **3.2.3 Přímý odporový ohřev skla**

Sklo s rostoucí teplotou ztrácí vlastnosti izolantu a stává se vodivým, proto lze na jeho tavení použít přímý odporový ohřev. Při tzv. vanovém tavení [5] je střídavý proud uváděn do skloviny ponořenými elektrodami, které mohou být uspořádány různě podle účelu. Materiálem elektrod je převážně grafit, případně chemicky čisté železo, od používání elektrod ze vzácných kovů se upustilo. Často se používá kombinace ohřevu skla plamenem, který slouží pro dodání základní surové teplo, a elektřinou, která zaručuje přesnost a čistotu výrobků [20].

### 3.2.4 Solné lázně

Přímý odporový ohřev se používá také v tzv. solných lázních [20]. Při tomto ohřevu je kovová vsázka ponořena v roztavené soli – elektrolytu, kterým prochází proud a tak vzniká teplo. Rozlišují se dva typy solných lázní podle toho, zda prochází proud vsázkou (a příkon závisí na vsázce) či ne. V druhém případě se vkládá vsázka do místa, kde není elektrické pole, proud vsázkou neteče, příkon na ní nezávisí. Elektrody mají velké styčné plochy, aby se zamezilo místnímu přehřátí. Zhotovují se z nízkouhlíkové oceli. Při ohřevu soli klesá její odpor, musí se tedy regulovat napětí. Pro různé teplotní rozsahy se používají různé soli s různými vlastnostmi.

Solné lázně se používají v nepřetržitém provozu kvůli jejich časově náročnému roztápní. Slouží zejména k ohřevu ocelových součástí ke kalení [8], např. kuliček nebo kroužků do kuličkových ložisek. Používají se i pro tepelné zpracování barevných kovů nebo slitin při teplotách až 1 400 °C. Hlavní výhodou je rychlý, přesný a rovnoměrný ohřev bez přístupu vzduchu.

### 3.2.5 Elektrodotový ohřev vody

Pro ohřívání vody lze mimo jiné využít elektrovodné kotle [20], ve kterých se využívá přímého odporového ohřevu. Střídavý proud se přivádí do grafitových nebo kovových elektrod a dále je veden vodou, kterou přímo ohřívá. Elektrická vodivost vody závisí samozřejmě na její teplotě a také na jejím chemickém složení, jehož změnou se dá regulovat i výkon kotle. Další možností regulace je změna vzdálenosti elektrod.

## 3.3 Nepřímý odporový ohřev

U zařízení s nepřímým odporovým ohřevem prochází elektrický proud topnými články, které předávají vzniklé teplo vsázce. Teplo se může z článků šířit všemi třemi způsoby popsány v kapitole 2.2, nejvýrazněji se na předání tepla podílí většinou sálání.

Odporové pece lze dělit podle několika kritérií [20]:

Podle teploty na pece

- nízkoteplotní (do 600 °C),
- středoteplotní (od 600°C do 1100 °C),
- vysokoteplotní (nad 1100 °C).

Podle atmosféry v pecním prostoru na pece

- s přirozenou normální atmosférou (vzduch),
- s řízenou atmosférou,
- s vakuem.

Podle použití v provozu na pece

- pro tepelné zpracování kovů,
- pro tavení kovů,
- pro tavení skla,
- pro chlazení skla,
- pro laboratoře, pro domácnosti.

Podle pohybového stavu vsázky na pece

- se stabilní vsázkou, s provozem přerušovaným,
- se vsázkou procházející pecí – pece průběžné s pohyblivým dnem, s provozem nepřerušovaným.

### 3.3.1 Odporové pece se stabilní vsázkou

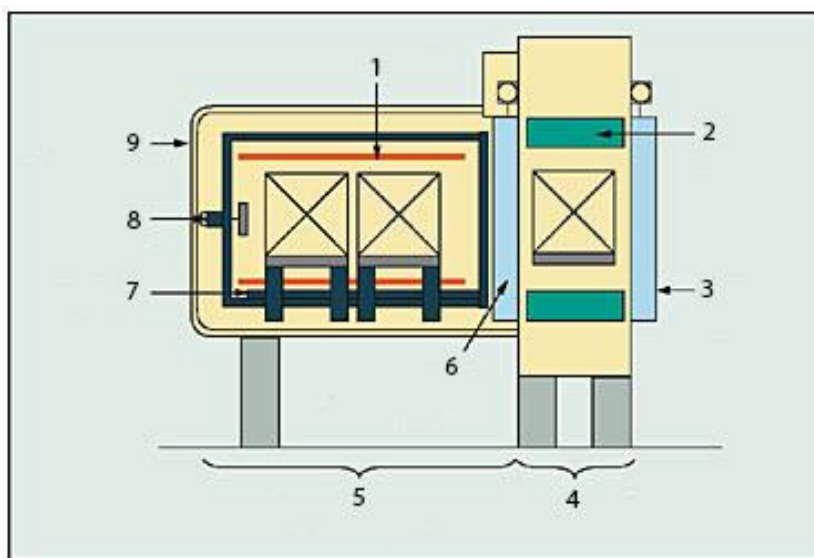
Odporové pece se stabilní vsázkou [3] [8] [20] jsou ty pece, ve kterých se vsázka nepohybuje. Vsázka se do pecí vkládá před každým ohřevem jednotlivě. Pece tedy pracují s přerušovaným provozem, kdy se podle manipulace se vsázkou pec zapíná a vypíná. Přehled některých pecí se stabilní vsázkou včetně stručného popisu je uveden v následujícím textu.

**Komorové pece** – jde o nejstarší typ odporové pece, který díky své univerzálnosti nachází široké uplatnění. Topné články jsou umístěny na bocích, ve dně nebo i ve stropě vnitřku komory a jsou zhotoveny z oceli, karborunda či jiných materiálů. Příklad komorové pece je na obrázku 3-1 [9]. V tomto případě jsou topné články umístěny i ve dveřích pece.



Obrázek 3-1: Příklad komorové pece [9]

Na obrázku 3-2 [21] je znázorněno schéma multifunkční komorové pece, kde 1 představuje topné články, 2 výměník tepla, 3 těsnící dveře, 4 chladicí komora, 5 operační komora, 6 těsnící a izolační dveře, 7 dopravní systém, 8 ventilátor, 9 servisní dveře.



Obrázek 3-2: Schéma multifunkční komorové pece [21]

**Vozíkové pece** – jsou to větší komorové pece, jejichž část (dno s čelem) se při nakládání a vykládání vsázky pohybuje na kolech. Vsázka se naloží mimo pec a s vozem se zajíždí do pece.

**Šachtové pece** – mají svislou osu, a proto se také nazývají jako pece hlubinné, většinou jsou zapuštěné pod podlahu. Mohou být hluboké až 20 m a snadno se izolují proti ztrátám tepla.

**Pokloповé (zvonové) pece** – poklop (zvon) s topnými články na svém vnitřním povrchu se jeřábem nasazuje na plošinu, kde je také vsázka. Ta je chráněná proti přímému sálání a nerovnoměrnosti ohřevu žáruvzdorným poklopem. Pod vsázkou bývá ventilátor.

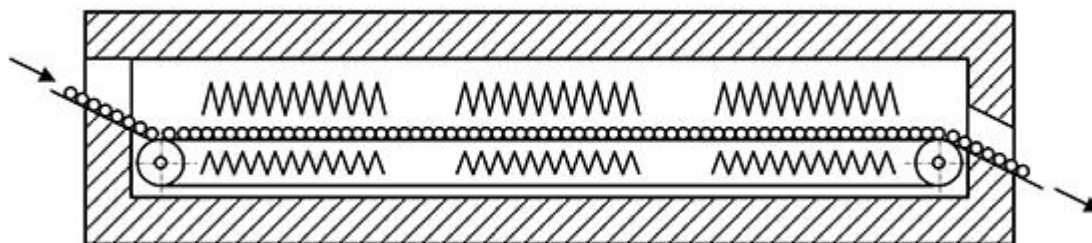
**Elevátorové pece** – pecní prostor je umístěn několik metrů nad zemí a vsázka je do něj zvedána hydraulickým zařízením. Vsázka může být umístěna na voze na kolejnici a pohybovat se v horizontálním směru, což umožňuje vřadit elevátorovou pec do průběžné výrobní linky. Topná část netrpí otřesy jako např. zvonová pec.

**Kelímkové pece** – konstruují se pro tavení kovů nebo slitin s nižším bodem tání (Sn, Pb, Al, Zn apod.). Kolem kelímku je umístěno topné vinutí, většinou v podobě soustředně obtočených odporových spirál. Pece jsou obvykle sklopné, aby se dal roztavený kov vylít. Zjednodušený náčrt řezu kelímkové pece je v příloze A. Kelímkovou odporovou tavicí pecí se bude zabývat praktická část této práce, kde bude proveden její tepelný výpočet.

### 3.3.2 Odporové pece průběžné

Průběžné odporové pece [3] [8] [20], většinou tunelovitěho typu, se používají v procesech s velkou výrobností a jsou konstruované pro trvalý provoz. Obecně mají tyto pece ve směru pohybu vsázky více teplotních pásem se samostatně regulovaným topením. Pece lze řadit za sebe a mohou tvořit jeden celek, který je mechanizovaný a naprogramovaný podle konkrétního technologického procesu. Často na pece navazují tzv. chladicí tunely, kde se vsázka řízeně ochlazuje. Podle mechanismu dopravy vsázky lze rozdělit průběžné pece na několik základních typů.

**Pásově pece** – schéma pásové pece je na obrázku 3-3. Dopravní pás ze žáruvzdorného materiálu projíždí pecí a nese na sobě vsázku. Poháněcí kladky i spodní část pásu mohou být umístěny vně pece, čímž odpadá problém jejich chlazení, avšak zvyšují se tepelné ztráty.



Obrázek 3-3: Schéma pásové pece [3]

**Válečkové pece** – obdoba pece pásové, ale místo dopravního pásu jsou zde nositelem vsázky válečky, které jsou řetězem napojeny na pohon.



**Narážecí pece** – vsázka se prostrkuje pecí elektromechanicky, nebo hydraulicky po keramických blocích, nebo vodičích lištách. S každým novým kusem zasunutým na vstupu pece se všechny kusy posunou a na konci vypadne poslední, ohřátý kus.

**Střásací pece** – jsou určeny k ohřevu drobné kusové vsázky do teploty 900 °C. Vsázka se umísťuje na žlab, který se směrem z pece pohybuje pomalu, směrem zpětným rychle, a tak se vlivem setrvačných sil vsázka setřásá.

**Bubnové pece** – buben má uvnitř šroubovou plochu, po které se při otáčení dopravuje drobná vsázka k propadu na druhý konec bubnu. Buben je vyráběn z drahého žáruvzdorného materiálu a je značně namáhán. Tento typ pecí se hodí ke kalení a žihání podložek, šroubů, menších ložiskových kroužků a kuliček.

**Karuselové pece** – jde o pece rotační, jejichž otáčení zajišťuje elektromotor. Ten je spolu s ostatními mechanismy umístěn mimo prostor s pracovní teplotou, proto se tyto pece konstruují pro nejvyšší teploty. Vsázka se vkládá do pece otvorem s dveřmi a po jedné otočce se výstupními dveřmi vedle vstupu vyjímá.

### 3.4 Materiály a součásti odporových pecí s nepřímým ohřevem

Při výpočtu, návrhu a konstrukci odporových pecí je potřeba znát jednotlivé části pece a materiály, ze kterých jsou zhotoveny. V následujícím textu bude uveden přehled konstrukčních částí pece a používaných materiálů.

#### 3.4.1 Základní části elektrických pecí

Běžná odporová pec pro nepřímý ohřev je tvořena těmito základními částmi [6]:

- žáruvzdorná vyzdívka,
- tepelná izolace,
- skříň pece,
- topné články a jejich uchycení,
- podávací mechanismy a jejich pohony.

Pece mají i další součásti jako např. přístroje pro měření a regulaci teploty, řízené zdroje proudu nebo zařízení pro tvorbu umělé atmosféry.

**Žáruvzdorná vyzdívka** [6] ohraničuje uvnitř pracovní prostor pece. Musí odolávat žáru, být dostatečně pevná, snášet změny teplot, být chemicky stabilní. Za účelem menších tepelných ztrát a dobré izolace tepelných článků by měla mít nízké hodnoty měrné tepelné kapacity a tepelné vodivosti. Žáruvzdorné díly se skládají do vrstev.

Nejčastěji se používají šamotové díly, složené z 38 % až 44 % z  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , zbytek je  $\text{SiO}_2$ . Pro vyzdívky mechanicky nenamáhané do 1200 °C se používají tzv. lehčené šamoty, které mají lepší vlastnosti tepelné izolační, avšak horší mechanické. Pro vysokoteplotní pece se používají díly zhotovené pouze z oxidu hlinitého, díly zirkoniové, elektro grafitové, z nekystalizovaného korundu atd.

**Tepelná izolace** [6] se zhotovuje z materiálů s přirozenou, nebo umělou porézností. Požadavky na materiály jsou přípustná teplota, měrná hmotnost a součinitel tepelné vodivosti. Jako příklady materiálů lze uvést azbest, magnezit, strusku, oxid hlinitý a skleněnou vatu.

**Skříň a konstrukce pece** [6] se vyrábějí z ocelových plechů a profilů, někdy také z litiny a ocelolitiny. Nejsou na ně kladeny žádné zvláštní požadavky, neboť pracují při normální teplotě. Části pracující uvnitř pece musí být žáruvzdorné a zhotovují se z materiálů jako chromová nebo chromniklová ocel.

**Topné články** jsou přímo zdroji tepla v prostoru pece, ohřívají se průchodem elektrického proudu a předávají teplo do okolí, tudíž na ně jsou kladeny zvláštní materiálové požadavky. Materiálová a konstrukční problematika je stručně popsána v následujících podkapitolách.

### 3.4.2 Materiály pro topné články

Materiály odporových topných článků by měly splňovat následující požadavky [20]:

- odolnost proti žáru při pracovní teplotě článku,
- velkou mechanickou pevnost za tepla,
- odolnost proti chemickým vlivům atmosfér pecí a keramiky,
- velkou rezistivitu (pro větší průřezy, menší délky, přímé připojení na síť),
- malý teplotní součinitel odporu,
- stálost vlastností po celou dobu životnosti,
- malou teplotní roztažnost,
- dobrou zpracovatelnost.

Uvedené vysoké nároky se nedaří vždy plnit, proto se v praxi volí kompromisní řešení. Podle charakteru materiálu se dělí topné články na kovové a nekovové.

#### Materiály kovové

*Austenitické slitiny* [2], [20] – jde o materiály nemagnetické, tzv. chromniklové. Nejběžnější je slitina Ni + Cr a Ni + Cr + Fe. Žáruvzdornost zajišťuje povrchová vrstva ochranného oxidu chromitého. Díky své dobré žáruvzdornosti, opracovatelnosti, odolnosti, teplotní a časové stálosti a velké rezistivitě jsou to materiály vysoce jakostní. Komerčně se vyskytují pod názvy jako Nikrothal, Chromiterm, Nichrom aj. Lze je použít do teploty 1250 °C.

*Feritické slitiny* [2], [20] – jsou to magnetické slitiny Cr + Al + Fe bez niklu. Ochranná povrchová vrstva je tvořena oxidem chromitým a hlinitým. Jsou vysoce žáruvzdorné a mají větší rezistivitu než slitiny austenitické. Komerčně jsou dodávány pod názvy jako Kanthal, Alsichrom, Alkrothal, Chromal, Aluchrom, Thermal aj. Feritické materiály jsou použitelné do teploty 1375 °C. Protože ochranná vrstva Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se tvoří až při teplotách nad 1000 °C, nedoporučuje se používat tyto slitiny při nižších teplotách.

*Čisté kovy* [20] – jsou určeny pro speciální aplikace, jako jsou například laboratorní pece. Používají se drahé kovy jako platina, wolfram a molybden.

*Ostatní slitiny* [2] – do této kategorie spadají Konstantan (Cu + Ni) a Nikelin (Cu + Ni + Fe). Jejich odpor se s teplotou téměř nemění, proto jsou vhodné pro použití v měřicí a regulační technice.

#### Materiály nekovové

*Karbid křemíku SiC* [8], [20] – nejčastěji používaný nekovový materiál, jehož rezistivita je mnohem vyšší než u kovů. Články se zhotovují ve formě tyčí se zesílenými konci nebo závitově prořízých trubek. Teplotní součinitel odporu je záporný asi do 800 °C, pro vyšší teploty je již

kladný. Články z karbidu křemíku se dodávají pod obchodní názvy Silit, Globar, Crusilit, Cesiwid aj.

*Cermetové články* [2] – základním materiálem je směs  $\text{MoSi}_2$  s  $\text{SiO}_2$ , která se nejčastěji lisuje do tvaru „U“. Pracovní teploty se pohybují až do  $1850\text{ }^\circ\text{C}$ , což umožňuje ochranná vrstva  $\text{SiO}_2$ . Články jsou ovšem křehké a jejich rezistivita se značně mění s teplotou.

*Uhlíkové a grafitové články* [20] – vyrábějí se ve tvaru tyčí a trubek aj. Pracovní teploty jsou až do  $2000\text{ }^\circ\text{C}$  ve vakuu, nebo v řízené atmosféře zabraňující oxidaci. Při normální atmosféře nastává oxidace od  $400\text{ }^\circ\text{C}$  u uhlíkových respektive od  $600\text{ }^\circ\text{C}$  u grafitových článků.

### **3.4.3 Konstrukce topných článků**

Ve většině případů sálají topné články do pecního prostoru teplo přímo svým povrchem. Tak je tomu u všech nekovových a většiny kovových článků. Druhá, méně zastoupená skupina kovových topných článků pracuje na principu přenosu tepla do okolí přes krytý izolant. Kovové topné články lze tedy rozdělit na dvě kategorie: články otevřené a uzavřené.

**Otevřené topné články** nejsou ničím kryté a teplo se z jejich povrchu přenáší (radiací, konvekcí, příp. kondukcí) do prostoru pece [20]. Zhotovují se z pásů a drátů do různých tvarů jako spirály, meandry nebo smyčky. V peci se buď zavěšují přímo na háky, nebo se vkládají do speciálních tvárnic ve stěnách.

**Uzavřené topné články** se konstruují tak, že topný vodič je zcela oddělen od vnější atmosféry nebo od ohřívaného média. Vodiče jsou tak izolovány od chemických a mechanických vlivů. Nejčastěji se jedná o ocelovou trubku, ve které je topná spirála zapuštěná v  $\text{MgO}$  (dobrý elektrický izolátor a tepelný vodič) [3]. Používají se jako ponorná tělesa k rychlému ohřevu kapalin [6].

## 4 Indukční tepelná zařízení

### 4.1 Základní poznatky o indukčním teple

Při indukčním ohřevu vzniká teplo průchodem (vířením) indukovaných proudů ohřivaným předmětem. Tento způsob ohřevu lze tedy aplikovat jen na materiály elektricky vodivé. Při vložení vodiče do cívky generovaného nestacionárního střídavého magnetického pole se v něm indukují vířivé proudy. Ty mají za následek vznik tepla podle Jouleova zákona. Zjednodušeně se přirovnává indukční tepelné zařízení k transformátoru, jehož sekundární vinutí je spojeno nakrátko [3]. Teplo vzniká přímo ve vsázce, čímž odpadá problém přenosu tepla a jeho akumulace ostatními součástmi.

Cívku lze chápat jako zdroj válcového elektromagnetického vlnění, které vyzařuje do své dutiny. To je přijímáno povrchem vsázky a způsobuje zmíněné vířivé proudy. Pronikající záření se ve vsázce postupně utlumuje. Vzdálenost, ve které amplituda intenzity záření dosáhne  $1/e$  násobku ( $e$  je Eulerovo číslo) své původní hodnoty, se označuje jako hloubka vniku  $\delta$  a lze vypočítat ze vztahu [3]

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} = 5,03 \cdot 10^2 \cdot \sqrt{\frac{1}{f \cdot \gamma \cdot \mu_r}}, \quad (4.1)$$

kde  $f$  je frekvence použitého záření, [ $f$ ] = Hz,  
 $\gamma$  konduktivita, [ $\gamma$ ] = S·m<sup>-1</sup>,  
 $\mu_r$  relativní permeabilita materiálu, [ $\mu_r$ ] = 1.

Změnami frekvence magnetického pole (tj. frekvence proudu v induktoru) lze tedy měnit hloubku vniku [3], která určuje rozložení vznikajícího tepla ve vsázce. Toho se využívá například v povrchových úpravách kovů, kdy se vhodnou frekvencí nastaví malá hloubka vniku.

Mimo povrchových úprav kovů se využívají indukční pece především pro tavení neželezných kovů, a také k ohřevu při tváření. Jde o jeden z nejjistších způsobů ohřevu, protože se do materiálu nepřenáší žádná cizí látka. Indukční pece dosahují vysokých příkonů a konstruují se v rozsahu od nízkých (síťových) frekvencí až po frekvence v řádu desítek MHz [2]. Některá konstrukční provedení indukčních zařízení budou popsána v dalším textu.

### 4.2 Základní provedení indukčních zařízení

Indukční ohřev se uplatňuje v různých typech elektrotepelných zařízení. Nejčastěji se používá pro tavení vsázky v indukčních pecích. Další použití indukčního ohřevu je při kalení, sváření, prohřívání materiálů a povrchových úpravách kovů.

Podle [14] se rozdělují indukční pece na

- pece bez železného jádra (kelímkové pece),
- pece s železným jádrem (kanálkové pece).

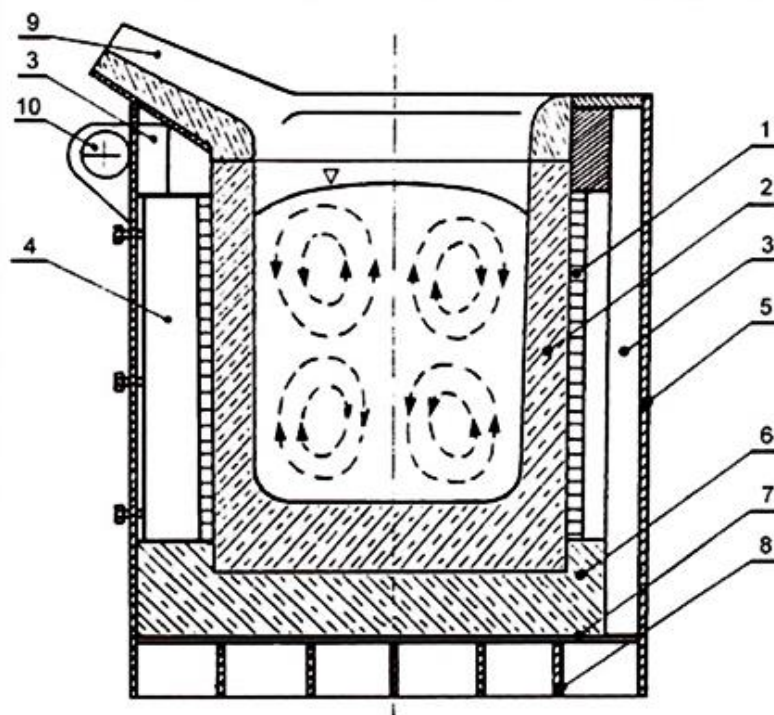
K přednostem indukčních pecí se řadí možnost tavení v libovolné atmosféře, minimální ztráty legujících přísad, chemická homogenita a rovnoměrná teplota taveniny, bezhlučný provoz a provoz bez imisí. K nedostatkům lze řadit vyšší náklady na vybavení elektrického agregátu, nižší výkonost pece, nižší životnost vyzdívky pece a nízkou teplotu strusky vůči tavenině [14].

#### 4.2.1 Indukční pece kelímkové

V průmyslu jsou indukční kelímkové pece podle [7] základními a nejčastěji využívanými zařízeními k tavení oceli, litiny a neželezných kovů. Jejich základním úkolem je nejčastěji roztavení tuhé vsázky. Indukční kelímkové pece se provozují v několika úpravách [8], a to jako pece s nevodivým kelímkem, pece s vodivým stínícím pláštěm, pece se železným jádrem vně cívky a pece s vodivým kelímkem.

Typická kelímková pec [7] je tvořena induktorem, kelímkem a s uzavřenou konstrukcí. Induktor bývá jednovinutový, jednofázový a napájený proudem jedné frekvence. Kelímkem je většinou keramický, ale ve zvláštních případech se používá i vodivý kelímkem. V uzavřené konstrukci jsou svazky transformátorových plechů vně vinutí.

Konstrukce kelímkové pece s vodivým stínícím pláštěm je schematicky znázorněna na obrázku 4-1 [8]. Kruhová ohřívací cívka 1 je navinuta jako jednovrstvová, nejčastěji dutým měděným vodičem čtyřhranného průřezu, kterým protéká chladicí voda. V dutině cívky je keramický zadusný kelímkem 2, nejčastěji z křemičitého písku. Svazky transformátorových plechů 3 jsou svisle uspořádány po celém vnitřním obvodu pláště pece 5. Tyto svazky svádějí magnetický tok vně cívky, aby nezabíhal do pláště a do dalších konstrukčních částí pece. Středící žárobetonové trávce 4 pro cívku jsou provedeny jako azbestocementové. Na dně pece je cihlová keramická vyzdívka 6. Stínící měděný plech 7 zabraňuje vniknutí magnetického toku cívky do mřížového dna pece 8. Tavenina se odlévá hubicí 9. Při vyklápění se pec otáčí kolem osy 10.



Obrázek 4-1: Schéma indukční kelímkové pece [8]

Cívka vyzařuje do vnitřní dutiny elektromagnetické vlnění, které dopadá kolmo na vsázku umístěnou v kelímku. Vsázka se díky pohlcení elektromagnetického vlnění ohřívá. Dutinou cívky prochází magnetický tok, který se uzavírá vně cívky. Je žádoucí, aby intenzita magnetického pole vně pece byla co nejmenší, aby nedocházelo k zahřívání nosné konstrukce. Proto se zařízení stíní vodivým pláštěm [14].

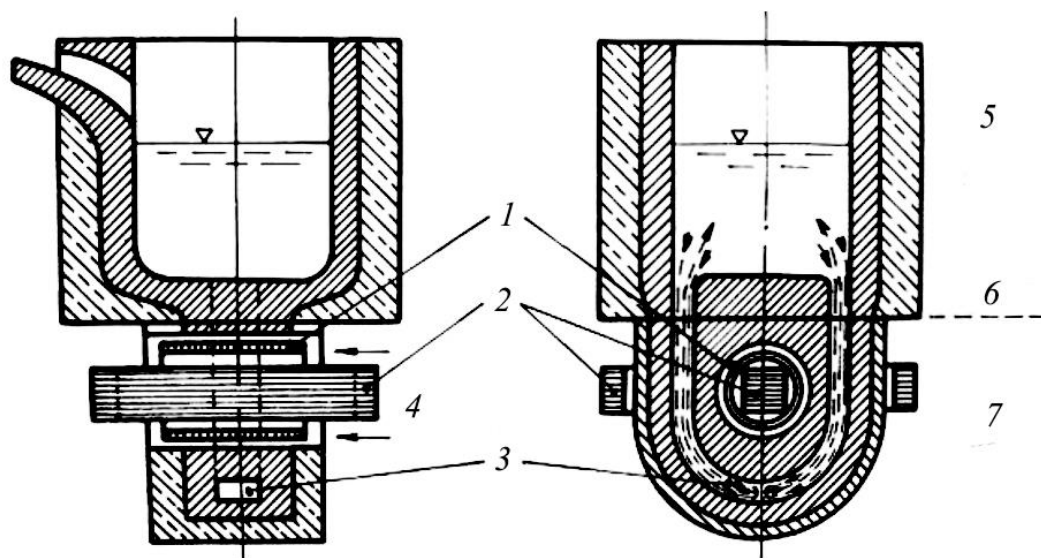
Jedinečnou výhodnou indukčních tavicích pecí [3] je silné víření taveniny vlivem elektrodynamických sil. Víření taveniny je znázorněno čárkovaně na obrázku 4-1. Na vsázku působí magnetické síly a u stěny kelímku vzniká v tavenině podtlak, v ose taveniny přetlak. Tavenina vtéká ke stěně a vzdouvá se ve středu kelímku.

Kelímkové tavicí pece se používají k tavení nejrůznějších kovů a vyrábějí se v nich vysoce kvalitní oceli. Napájí se napětím buď s frekvencí střední (velké pece 500 Hz, menší až do 4 kHz), nebo s frekvencí 50, či 150 Hz. Staví se v rozmezí kapacit od 10 kg až do 100 tun oceli [20].

#### 4.2.2 Indukční pece kanálkové

Indukční kanálkové pece mají železné jádro a jejich konstrukce připomíná transformátor [7]. Primární vinutí představuje induktor, který je připojený na síť a umístěný na magnetickém jádru. Funkci sekundárního vinutí plní roztavený kov umístěn v kanálku. Jde tedy o závit spojený nakrátko.

Konstrukce kanálkové pece je schematicky znázorněna na obrázku 4-2 [8], ve kterém je 1 ohřívací cívka chlazená vzduchem (vyznačeno šipkami), 2 jádro z transformátorových plechů plášťového typu, na jehož středním sloupku je ohřívací cívka, 3 kanálek, který obepíná ohřívací cívku jako závit nakrátko, 4 chladicí vzduch, 5 vana pece, 6 dělicí spára a 7 induktor.



Obrázek 4-2: Indukční kanálková pec [8]

Induktory kanálkových pecí se napájí výlučně síťovou frekvencí [7]. Magnetický tok se uzavírá v magnetickém jádru a indukuje proud a elektrodynamické síly v roztaveném kovu v kanálku. Tekutý kov se vlivem proudu zahřívá a vlivem působících sil víří. Ohřívaná tavenina se díky intenzivní cirkulaci promíchává se zbytkem chladnější vsázky ve vaně, čímž je docíleno

homogennosti kovu. Pro započítí práce a další činnosti kanálkové pece je tedy nutný uzavřený sekundární obvod v podobě roztaveného kovu v kanálku pece. K tomu slouží zbytková tavenina z předchozí tavby, nebo se kanálek zaplní kovem roztaveným v jiné peci.

Kanálkové pece se využívají v mnoha průmyslových odvětvích, především ve slévárenství pro tavení oceli a její přihřívání v roztaveném stavu. Používají se také pro tavení barevných kovů a zušlechťování šedé litiny. Kanálkové indukční pece mají lepší celkovou energetickou účinnost než pece kelímkové, podle [14] se pohybuje v rozmezí 70 – 80 %. Jejich nevýhodou je však nutná přítomnost roztaveného kovu před první tavbou. Proto se tento typ pecí nehodí pro přerušovaný provoz nebo pro časté střídání složení kovu [20]. Udržování pracovní teploty při pracovních změnách by zhoršovalo zmíněnou energetickou účinnost.

#### **4.2.3 Indukční ohřevy pro tváření**

Indukční ohřevy pro tváření se podle [3] pro své osvědčení používají při hromadné výrobě zápusťkových výkovek v automobilkách, v továrnách na valivá ložiska, nářadí, šrouby aj. Jedná se o ohřevy přířezů a úlomků, o průběžné ohřevy tyčového materiálu a o ohřevy konců tyčového materiálu.

Zařízení pro ohřev úlomků a ústřihů [20] je ve své podstatě průběžná pec tvořená induktorem. Na jedné straně vstupují studené kusy, které se v induktoru zahřívají na kovací teplotu, na druhé straně vypadávají přímo do kovacího stroje. Speciálním tvarováním výstupní části vinutí je docíleno rovnoměrného ohřevu všech kusů.

Pro kování matic, ložiskových kroužků apod. se používá indukční průběžný ohřev tyčí [20]. Ohřevy tohoto typu jsou spojeny s vysoce výkonnými a automatickými postupovými kovacími stroji a tvoří kovací linku s mimořádně vysokou produkcí.

Ohřevy konců tyčového materiálu se provádí v oválné cívce, do jejíž dutiny je zasunuto větší množství tyčí. Zakládání studených a vyjímání ohřátých tyčí se uskutečňuje cyklicky. Tento proces lze také plně zautomatizovat.

#### **4.2.4 Indukční povrchový ohřev**

Výhodou indukčních zařízení je možnost ovlivnit hloubku ohřáté vrstvy. To úzce souvisí s hloubkou vniku (viz kap. 4.1) a tedy i frekvencí použitého napájecího proudu. V průmyslu se používají prohřívací indukční zařízení pro účely jako kalení, pájení, svařování a rafinační přetavování [8].

Povrchové indukční kalení [20] se provádí například u velkých ocelových válců pro válcování stolice na plech, ale také u menších součástí, jako jsou klikové a vačkové hřídele atd. Prakticky jde o protažení kaleného předmětu induktorem a o následné ochlazení sprchováním. Předmět se obvykle předehřeje několikerým protažením induktorem a teprve potom se pustí voda do sprchy. Bez předehřevu by vlivem strmého teplotního spádu směrem dovnitř předmětu docházelo k velkým pnutím, které by mohly způsobit praskání tělesa. Povrchové kalení má velkou výhodu v tom, že se součást nedeformuje teplem a kalením a že vnitřek zůstává houževnatý. Používají se frekvence v rozmezí 50 Hz až 10 kHz, případně i vysoké frekvence v řádu stovek kHz pro malé hloubky prokalení.

## 5 Základy tepelných výpočtů pecí

Funkcí elektrotepelných zařízení je přeměna elektrické energie na tepelnou. Proto lze i výpočty rozdělit na dvě části, a to na výpočty elektrické a tepelné, které spolu ovšem musí korespondovat. Elektrická část se týká například parametrů náhradního obvodu, návrhu a dimenzování silových a řídicích obvodů, symetrizace obvodu, kompenzace jalového výkonu atd. Tepelná část výpočtu, která je předmětem této práce, se zabývá určováním množství tepla potřebného v zařízení vytvořit, tepelných ztrát, hodnot teploty v jednotlivých částech pece, doby ohřevu vsázky atd.

Bez ohledu na způsob vzniku tepla v pecním prostoru jsou fyzikální zákonitosti sdílení tepla stejné, a proto lze tepelný výpočet do jisté míry považovat za obdobný pro různá elektrotepelná zařízení. Výpočty se liší v návrhu zdrojů tepla a jevech při jeho přenosu do vsázky. Popsána byla odporová a indukční tepelná zařízení (viz kap. 3 a 4). V případě odporového ohřevu vzniká teplo v odporových člancích a přenáší se do vsázky. Zde se navrhuje topné články, především z hlediska vhodného materiálu, průřezu, délky, jejich počtu a rozmístění. U indukčního ohřevu, kde vzniká teplo přímo ve vodivé vsázce, je důležitá realizace induktoru a také frekvence napájecího elektrického proudu. Další popis tepelného výpočtu se bude vztahovat především k odporovým pecím s tím, že pro indukční pece vychází určité části výpočtu ze stejných principů.

Tepelné výpočty elektrotepelných zařízení mohou nabývat různých variací podle zadání a cílů úlohy. Jde jak o navrhování nových zařízení, tak o výpočty již existujících zařízení za účelem ověřování či optimalizace. V další části práce (kap. 6) bude provedena jedna z možností výpočtu, a to tepelný výpočet v částečném návrhu odporové kelímkové pece. Výpočet bude také automatizován pomocí výpočetního programu (viz kap. 7).

### 5.1 Postup návrhu odporové pece

Při návrhu pece se tepelné výpočty provádějí za účelem získání celkového výkonu pece a její tepelné účinnosti [7]. Počátečním odhadem a orientačním výpočtem se určí základní parametry pece, které umožní přibližný návrh konstrukce pece. Tento návrh se kontroluje a opravuje podrobnějšími výpočty. Kontrolují se zejména rozměry pece z hlediska dané výrobní technologie, tepelná izolace, tepelné ztráty, příkon, účinnost, průběhy teplot, doby náběhu a ochlazování aj.

Elektrické odporové pece se navrhuje podle určitého postupu, vycházejícího ze základních technických údajů. Základní osnova návrhu se skládá z těchto bodů [19]:

- druh pece – vychází z požadovaného tepelného zpracování, způsobem práce apod.,
- velikost vsázky – je určena z výroby a stanoví se z maximální hmotnosti jedné vsázky s ohledem na rozměry zpracovávaných součástí,
- užitečný vnitřní prostor – vychází z velikosti vsázky a určuje základní konstrukci,
- provozní teploty – stanovují dobu trvání tepelných pochodů a požadavky na použité materiály,



- výpočet tepelné energie – týká se především ohřevu vsázky (s případnou změnou skupenství), vyhřátí vyzdívky a jiných částí pece, ztrát různého původu aj.,
- příkon pece – je stanoven z celkové tepelné energie, potřebné pro uskutečnění požadovaného teplotního režimu, závisí také na době ohřevu,
- výpočet odporových článků – stanovuje počet a velikost topných článků, které vytvoří požadované teplo v odporové peci,
- rozmístění topných článků – týká se zajištění rovnoměrnosti ohřevu,
- způsob regulace a kontrola teploty – zajišťuje požadovaný teplotní režim při minimální spotřebě elektrické energie.

## 5.2 Výpočet doby ohřevu vsázky

Zjištění doby ohřevu je nezbytné pro výpočet celkového elektrického příkonu pece. Požadované trvání ohřevu může být zadáno, ale v praxi jde často o neznámou veličinu, kterou je nutno vypočítat. Pro výpočet se předpokládá dobrá znalost vsázky, pece a její pracovní teploty.

### 5.2.1 Tepelná velikost vsázky

Doba ohřevu závisí na několika faktorech, rozhodující je přípustná rychlost změny teploty ve vsázce a s tím související tepelná velikost vsázky [15]. Rozlišuje se tepelně tenká (drobná) a tepelně masivní vsázka, a to na základě podobnostních kritérií. Tepelně tenká vsázka má ve stejném okamžiku ve všech bodech stejnou teplotu. U tepelně masivní vsázky již při přenosu tepla z jejího povrchu do jejího nitra nastává určité dopravní zpoždění. Dohodnutými faktory pro určení tepelné velikosti vsázky jsou Biotovo a Starkovo podobnostní kritérium.

Pro tepelně tenkou vsázku platí [16]:

- při převládajícím konvekčním režimu

$$Bi = \frac{\alpha \cdot s}{\lambda} < 0,25, \quad (5.1)$$

- při převládajícím sálavém režimu

$$Sk = \frac{c_s}{100} \cdot \left( \frac{T}{100} \right)^3 \cdot \frac{s}{\lambda} < 0,15, \quad (5.2)$$

kde  $Bi$  je Biotovo kritérium,  $Sk$  Starkovo kritérium,  $s$  charakteristický rozměr vsázky,  $\lambda$  tepelná vodivost vsázky,  $\alpha$  součinitel přestupu tepla,  $c_s$  celkový součinitel sálání,  $T$  teplota sálajícího článku.

V případě, kdy je  $Bi > 0,25$ , respektive  $Sk > 0,15$ , je vsázka tepelně masivní.

### 5.2.2 Tepelný režim pece

Výpočet doby ohřevu se odvíjí od tepelného režimu konkrétní odporové pece [16]. Nejčastěji se uplatňuje režim při konstantní teplotě pece a režim při konstantní hustotě tepelného toku

dopadajícího na vsázku. Záleží také na tom, jakým způsobem se teplo vsázce předává. Rozlišuje se konvekční, radiační a konvekčně radiační režim ohřevu.

Častým případem jsou pece s velkou tepelnou kapacitou, kde má vložená vsázka zanedbatelný vliv na teplotu v peci. U těchto pecí se uplatňuje tepelný režim s konstantní teplotou pece. V praktických úlohách je navíc často potřeba počítat s přestupem tepla sáláním i prouděním. Pro tento tepelný režim se používají dvě metody určování doby ohřevu, a to metoda iterační a metoda paraboly. Jednotlivé způsoby výpočtu pro různé tepelné režimy jsou uvedeny v [16].

### 5.3 Výpočet příkonu pece

Je-li nyní známa doba ohřevu vsázky, lze počítat celkový elektrický příkon pece. Ten závisí mimo doby ohřevu na množství celkového tepla, které je potřeba dodat do zařízení. Ideální elektrický příkon periodické odporové pece [15] je definován vztahem:

$$P_o = \frac{Q_o}{t_{vs}}, \quad (5.3)$$

kde  $Q_o$  je spotřebované teplo v průběhu jednoho pracovního cyklu pece,  $t_{vs}$  doba ohřevu vsázky.

Celkové spotřebované teplo sestává z několika složek a je dáno vztahem

$$Q_o = Q_{vs} + Q_z + Q_{ak}, \quad (5.4)$$

tedy součtem užitečného tepla na ohřev vsázky  $Q_{vs}$ , tepla na ohřev pomocných materiálů v komoře pece  $Q_{ak}$  a celkovými tepelnými ztrátami  $Q_z$ . Užitečné teplo se zjistí z kalorimetrické rovnice. Při změně skupenství vsázky (např. tavení kovů) může kalorimetrická rovnice nabývat podoby

$$Q_{vs} = m \cdot c_{q1} \cdot (T_{vs,t} - T_{vs,0}) + m \cdot c_{qs} + m \cdot c_{q2} \cdot (T_{vs,k} - T_{vs,t}), \quad (5.5)$$

kde  $c_{q1}$  je měrná tepelná kapacita vsázky v pevném skupenství,  $c_{q2}$  měrná tepelná kapacita vsázky v kapalném skupenství,  $c_{qs}$  skupenské teplo,  $T_{vs,0}$  počáteční teplota vsázky,  $T_{vs,t}$  teplota tání vsázky,  $T_{vs,k}$  konečná teplota vsázky.

Teplo spotřebované na ohřev pomocných materiálů se vypočte analogicky pomocí kalorimetrické rovnice. Celkové tepelné ztráty se skládají ze ztrát v průběhu ohřevu, výdrže, chladnutí vsázky a prostoje pece [15]. Všechny dílčí ztrátové tepelné toky lze vypočítat ze zásad sdílení tepla s ohledem na konkrétní tvar pece a vlastnosti materiálů.

Při známé konstrukci pece a známé provozní teplotě lze vypočítat tepelné ztráty stěnami pece analyticky s použitím Fourierova zákona pro vedení tepla. Jinou cestou je ztráty odhadnout pomocí procentního navýšení užitečného tepla.

Po stanovení užitečného, přídavného a ztrátového tepla je možné určit základní parametry pece. Ideální elektrický příkon se vypočte podle vztahu (5.3). Skutečný příkon je nutno uvažovat vyšší

$$P = k_B \cdot P_o, \quad (5.6)$$

kde  $k_B$  je tzv. součinitel bezpečnosti a zohledňuje například snížení napětí sítě, zvýšení odporu výhřevných článků, zvýšení tepelné vodivosti izolace vlivem stárnutí materiálů apod. Hodnoty  $k_B$  se pohybují v rozmezí 1,1 – 1,5. Při volbě součinitele bezpečnosti se musí najít kompromis mezi technickou a ekonomickou stránkou věci, a to na základě konkrétní aplikace a zkušeností. Obecně lze říci, že pece s přerušovaným provozem mají vyšší součinitel bezpečnosti než pece průběžné [6]. Periodicky pracující pece se totiž potřebují rychleji vyhřát na požadovanou teplotu.

Tepelná účinnost pece  $\eta_t$  je pak podílem užitečného tepla a celkového vyrobeného tepla

$$\eta_t = \frac{Q_{vs}}{Q_c}. \quad (5.7)$$

## 5.4 Výpočet topných článků

Při navrhování elektrických odporových pecí je klíčový návrh topných článků, které zajišťují přeměnu elektrické energie na požadované teplo. Topné články odvádějí ze svého povrchu teplo především sáláním. Na sdílení tepla se podílí i proudění pecní atmosféry a částečně i vedení. Z jednotkového povrchu článku lze při daném oteplení odvést jen určitý výkon. Tento výkon se nazývá dovolené měrné povrchové zatížení  $p$ .

Výchozími parametry pro výpočet topných článků jsou [20]:

- dovolené měrné povrchové zatížení  $p$ ,
- příkon topného článku  $P$ ,
- rezistivita materiálu článku při dané teplotě  $\rho$ ,
- napětí článku  $U$ ,
- průřez  $S$  topného článku (kruhový, nebo obdélníkový).

Výpočtem se určuje

- průměr  $d$  topného drátu, nebo rozměry topného pásu,
- délka  $l$  topného drátu, nebo pásu.

Při výpočtu se porovnává teplo vzniklé průchodem proudu a teplo, které je článek schopen svým povrchem odevzdat. Po vztažení obou tepel ke stejnému časovému úseku stačí porovnávat příslušné výkony. Tepelný výkon vzniklý průchodem elektrického proudu v článku lze vyjádřit pomocí napětí článku a jeho odporu

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{S \cdot U^2}{l \cdot \rho}. \quad (5.8)$$

Příkon vyjádřený pomocí dovoleného povrchového zatížení  $p$  je

$$P = O \cdot l \cdot p, \quad (5.9)$$

kde  $O$  je obvod topného vodiče.

Zavedením poměru průřezu k obvodu vodiče

$$\xi = \frac{S}{O} \quad (5.10)$$

a porovnáním vztahů (5.8) a (5.9) lze vyjádřit obsah průřezu vodiče

$$S = \sqrt{\frac{P^2 \cdot \rho \cdot \xi}{p \cdot U^2}}. \quad (5.11)$$

Pro patřičné průřezy lze určit specifické rozměry topného článku. Například pro kruhový průřez topného článku je

$$S = \frac{\pi d^2}{4}, \xi = \frac{d}{4} \quad (5.12)$$

a pro průměr topného drátu pak platí vztah

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot P^2 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot p \cdot U^2}}. \quad (5.13)$$

Délku drátu lze určit z rovnice (5.9) dosazením náležité hodnoty obvodu. Pro kruhový průřez je  $O = \pi d$  a délka vodiče je tedy

$$l = \frac{P}{\pi \cdot d \cdot p}. \quad (5.14)$$

Při návrhu se obvykle vybere katalogový topný vodič, který je rozměrově nejbližší vypočtenému a zároveň splňuje ostatní kladená kritéria. Jde zejména o dovolené povrchové zatížení, které je hlavním faktorem pro životnost topných článků.

## 5.5 Výpočet indukčních pecí

Při výpočtu indukčních pecí se musí brát v potaz interakce cívky se vsázkou, případně železným jádrem a stíněním. Jde tedy o výpočet komplexnější a složitější, než je návrh systému topných článků. Problematika výpočtů indukčních zařízení je zpracována v [13]. Protože teorie indukčních ohřevů a jejich matematický popis jsou příliš rozsáhlé, práce se jimi nebude dále zabývat. Pro tepelný výpočet postačí vědět, že stanovení potřebného tepla, výpočet ztrát a tepelné účinnosti pece jsou stejné jako u zařízení odporového, na které se bude vztahovat další text práce.

## 6 Tepelný výpočet odporové kelímkové pece

Kelímkové pece se obecně používají k tavení kovů (viz kap. 3.3.1 a 4.2.1). Ať už jde o odporový, nebo indukční způsob ohřevu, určitá část tepelného výpočtu je stejná. U odporové pece se podle potřebné teploty navrhuje systém topných elementů, které jsou běžně umístěny v soustředných drážkách okolo kelímku. U indukčních pecí se navrhuje induktor, který indukuje do vsázky vířivé proudy způsobující vznik požadovaného množství tepla. Potřebné teplo pro tavení je ale u obou typů ohřevu stejné. Také například tepelné ztráty prostupem tepla stěnami se počítají stejně.

V dalším textu bude řešen tepelný výpočet v částečném návrhu odporové kelímkové pece. Při výpočtu se bude zavádět několik zjednodušujících předpokladů a některé jevy se budou idealizovat. Kompenzace těchto zjednodušení, a tím bezpečnějšího návrhu, bude docíleno zavedením několika koeficientů. Postup výpočtu se opírá o návrh kelímkové pece uvedený v [3].

Následující výpočet je zautomatizován v tabulkovém kalkulátoru Microsoft Office Excel<sup>®</sup>. Uživatel do programu zadává materiálové a konstrukční vlastnosti pece, vsázky, topných článků atd. Výpočet probíhá postupně podle schématu, do něž může uživatel zasahovat a například pomocí číselníků a přepínačů volit určité parametry. Výpočetní program bude popsán v kapitole 7.

### 6.1 Definice problému

Výpočet bude prováděn pro známou konstrukci kelímkové odporové pece, která je zjednodušená a omezená na základní geometrické tvary. Celá pec má tvar rotačního válce s osou ve středu kelímku. Uvažovány jsou konstrukční části: kelímek, topné spirály, keramické nosníky, žáruvzdorná vyzdívka, vrstva izolačních tvárnic, ocelový plášť, víko pece a dvě izolační vrstvy dna. Okótovaný výkres řezu uvažovanou pecí je v příloze A. Na začátku výpočtu jsou známy všechny rozměry s výjimkami výšky vsázky  $h_{vs}$ , výšky kelímku  $h_k$  a výšky nosníku  $h_n$ , které jsou dílčími výsledky výpočtu. Rozměry pece a materiálové vlastnosti jednotlivých částí se mohou převzít z existujícího projektu, ve výpočetním programu je může uživatel libovolně měnit.

Kelímková pec má roztavit granulovanou vsázku a ohřát ji na požadovanou teplotu. Na začátku výpočtu jsou zadány materiál a hmotnost vsázky, požadovaná teplota přehřátí a doba, za kterou má být vsázka roztavena. Další vstupní údaje, jako jsou například údaje o zvolených topných člancích nebo různé navyšovací koeficienty, se přebírají z odborné a firemní literatury. Uvažujme, že pec bude napájena třífázově.

Úkolem tepelného výpočtu je zejména navrhnout topný systém, určit elektrický příkon, tepelnou účinnost a celkovou dobu práce. Důležitá je ovšem i znalost dílčích výsledků výpočtu, jako je například rozložení teplot v izolačních vrstvách, výška kelímku atd. Samotný výpočet je rozdělen do čtyř částí, kterým odpovídají následující kapitoly 6.2 až 6.5.

## 6.2 Určení potřebného tepla a teploty spirál

Jelikož je známa doba ohřevu vsázky ze zadání, můžeme přistoupit rovnou k výpočtu potřebného tepla a následně příkonu pece (viz kap. 5.2 a 5.3). Podle rovnice (5.5) určíme teplo potřebné pro ohřev a roztavení vsázky. Za předpokladu, že hodnota měrné tepelné kapacity je nezávislá na teplotě a skupenství vsázky, se rovnice zjednoduší na

$$Q_{vs} = m \cdot c_{q,Al} \cdot (T_{vs} - T_0) + m \cdot c_{qs} \cdot \quad (6.1)$$

K teplu zahřívajícímu vsázku se musí přičíst teplo odváděné do okolí, které se na začátku odhadne a vyjádří poměrně k teplu  $Q_{vs}$ . Podle [3] se poměrná procentní hodnota  $q_z\% = Q_z/Q_{vs}$  volí v rozmezí 15-25 %. Celkově potřebné teplo pro ohřev je pak

$$Q_o = Q_{vs} + Q_z = \left(1 + \frac{q_z\%}{100}\right) \cdot Q_{vs} \cdot \quad (6.2)$$

Pro tepelné výpočty je nezbytné zjistit velikost plochy, kterou teplo do vsázky prostupuje. Ta závisí na objemu vsázky a rozměrech kelímku pece. Nejdříve určíme objem hliníku za studena

$$V_0 = \frac{m}{\rho_{h20,Al}} \cdot \quad (6.3)$$

Z důvodu nekompaktnosti materiálu a jeho teplotní roztažnosti se objem nadsazuje o tzv. koeficient plnění  $k_{pln}$ , který může být podle [3] např. 40%

$$V_{vs} = \left(1 + \frac{k_{pln}}{100}\right) \cdot V_0 \cdot \quad (6.4)$$

Z objemu lze určit výšku hladiny vsázky. Zde zavedeme zjednodušující předpoklad, že kelímek má tvar válce o středním průměru  $d_{sk}$ . Ve skutečnosti se u kelímkových pecí jedná o komolý kužel, ale protože jeho zkosení je velmi malé, stačí počítat s válcem, což výpočty značně usnadní

$$h_{vs} = \frac{4 \cdot V_{vs}}{\pi \cdot d_{sk}^2} \cdot \quad (6.5)$$

Výšku kelímku je ale potřeba navrhnout o něco větší. Procentní navýšení nad hladinu vsázky označme  $h_k\%$ . Při tloušťce dna kelímku  $s_k$  je vnější výška kelímku

$$h_k = \left(1 + \frac{h_k\%}{100}\right) \cdot h_{vs} + s_k \cdot \quad (6.6)$$

Předpokládejme, že topný systém bude rozmístěn pouze do výšky hladiny vsázky  $h_{vs}$  a teplo bude tedy z kelímku do vsázky přiváděno plochou

$$S_{p,k,in} = h_{vs} \cdot \pi \cdot d_{sk} \cdot \quad (6.7)$$

přičemž kelímek o tloušťce stěny  $s_k$  bude topnými články ozařován na ploše

$$S_{p,k,out} = h_{vs} \cdot \pi \cdot (d_{sk} + 2 \cdot s_k) \cdot \quad (6.8)$$

Uvažujme, že teplo se do vsázky přivádí pouze vedením skrze stěnu kelímku. Vedení tepla popisuje Fourierův zákon (viz kap. 2.1) a pro stacionární vedení tepla válcovou stěnou lze odvodit s odpovídajícím značením vztah

$$Q_o = \frac{2\pi \cdot h_{vs} \cdot \lambda_k}{\ln \frac{d_{sk} + 2 \cdot s_k}{d_{sk}}} \cdot \Delta T_k \cdot t_{vs}, \quad (6.9)$$

kde  $\lambda_k$  je tepelná vodivost kelímku,  $\Delta T_k$  je teplotní spád v kelímku a  $t_{vs}$  je doba ohřevu vsázky. Ze vztahu (6.9) vyjádříme teplotní spád

$$\Delta T_k = \frac{Q_o \cdot \ln \frac{d_{sk} + 2 \cdot s_k}{d_{sk}}}{2\pi \cdot h_{vs} \cdot \lambda_k \cdot t_{vs}}. \quad (6.10)$$

Pozn.: Teplotní spád byl spočten pro zákonitosti vedení tepla ve válcové stěně. Pro vedení ve stěně rovinné bude spočítán až v automatickém výpočetním programu s možností porovnání obou variant. Výpočet vedení tepla v rovinné stěně je také uveden při počítání tepelných ztrát v následující kapitole.

Teplota vnější stěny kelímku je součtem teploty vsázky a teplotního spádu ve stěně kelímku

$$T_{out,k} = T_{vs} + \Delta T_k. \quad (6.11)$$

Předpokládejme, že se teplo ze spirál o teplotě  $T_{sp}$  předává do kelímku výlučně sáláním. Ze Stefanova–Boltzmannova zákona lze odvodit vztah pro množství tepla sdíleného sáláním mezi dvěma tělesy

$$Q_r = Q_o = c_s \cdot (T_{sp}^4 - T_{out,k}^4) \cdot S_{p,k,out} \cdot t_{vs}, \quad (6.12)$$

kde  $c_s$  je součinitel celkového vzájemného sálání a závisí na vlastnostech povrchů spirály a kelímku. Určíme ho ze vztahu

$$c_s = \frac{1}{\frac{1}{c_{sp}} + \frac{1}{c_k} - \frac{1}{\sigma_{SB}}}, \quad (6.13)$$

kde  $c_{sp}$  je součinitel vyzařování spirál,  $c_k$  je součinitel vyzařování kelímku a  $\sigma_{SB}$  je Stefanova–Boltzmannova konstanta, viz vztah (2.4).

Teplota spirál je potom ze vztahu (6.12)

$$T_{sp} = \sqrt[4]{\frac{Q_o}{c_s \cdot S_{p,out} \cdot t_{vs}} + T_{out,k}^4}. \quad (6.14)$$

Podle provozní teploty spirál se z nabídky výrobců vybere vhodný typ topných elementů. V tomto případě je zvolen drát Kanthal, který bude ve tvaru spirály uložen na keramických nosnících umístěných kolem kelímku.

### 6.3 Výpočet tepelných ztrát a celkového příkonu

Při znalosti konstrukce a materiálových vlastností lze spočítat tepelné ztráty průchodem tepla skrze plášť, dno a víko pece. Stejně jako při výpočtu teplotního spádu v kelímku se použije Fourierův zákon. Pro vedení tepla složenou rovinnou, respektive válcovou stěnou jsou odvozeny vztahy pro tepelný tok

$$\Phi = \frac{S \cdot \Delta T}{\sum_i \frac{s_i}{\lambda_i}}, \quad (6.15)$$

resp.

$$\Phi = \frac{2\pi \cdot l \cdot \Delta T}{\sum_i \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{out,i}}{r_{in,i}}}. \quad (6.16)$$

Protože povrch vnější vrstvy pláště se chladí ještě přirozenou konvekcí okolního vzduchu, dochází ke kombinovanému přestupu tepla vedením a prouděním. Vliv proudění lze zanést do vztahů (6.15) a (6.16) jednoduše doplněním o člen vyplývající z Newtonova zákona [16]. Upravené vztahy pro tepelné toky jsou pak

$$\Phi = \frac{S \cdot \Delta T}{\sum_i \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha}}, \quad (6.17)$$

resp.

$$\Phi = \frac{2\pi \cdot l \cdot \Delta T}{\sum_i \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{out,i}}{r_{in,i}} + \frac{1}{\alpha \cdot r_{out}}}, \quad (6.18)$$

kde  $\alpha$  je součinitel přestupu tepla proudění vzduchu při povrchu pece. Z uvedených vztahů je patrné, že pro výpočet ztrát je nutné znát celkový teplotní spád v daném směru. Výpočet ztrát rozdělíme na ztráty pláštěm ve směru radiálním a ztráty víkem a dnem ve směru axiálním.

#### 6.3.1 Ztráty pláštěm

Počítejme nyní ztráty přes boční válcovité stěny pece. Jako místo s nejvyšší teplotou považujme střed spirály odporového drátu s teplotou  $T_{sp}$ . Okolí pece má teplotu  $T_0$ . Celkový teplotní spád je tedy

$$\Delta T_c = T_{sp} - T_0. \quad (6.19)$$

Ztrátový výkon bočních stěn pece spočítáme dvěma způsoby – jak pro válcovou stěnu podle vztahu (6.18), tak pro rovinnou stěnu podle vztahu (6.17). Pro válcovou stěnu je ztrátový výkon

$$P_{z,pl,v} = \frac{2\pi \cdot h_k}{\sum_i \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{out,i}}{r_{in,i}} + \frac{1}{\alpha_{sv} \cdot r_{out,pl}}} \cdot \Delta T_c, \quad (6.20)$$



kde  $\alpha_{sv}$  je součinitel přestupu tepla při přirozené konvekci vzduchu u svislé stěny pláště s vnějším poloměrem  $r_{out,pl}$ .

Zavedme tepelný odpor válcové stěny<sup>ii</sup> jednotlivých vrstev jako

$$R_{vi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{out,i}}{r_{in,i}}, \quad (6.21)$$

pak celkový tepelný odpor je součtem dílčích tepelných odporů izolačních vrstev a tepelného odporu fiktivní mezní vrstvy [16], reprezentující vliv proudění vzduchu při vnějším povrchu pláště

$$R_{vc} = \sum_i \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{out,i}}{r_{in,i}} + \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_{sv} \cdot r_{out,pl}}. \quad (6.22)$$

Poté lze zapsat ztrátový výkon jako

$$P_{z,v,pl} = \frac{\Delta T_c}{R_{vc}} \cdot h_k = P_{zj,v,pl} \cdot h_k, \quad (6.23)$$

kde  $P_{zj,v,pl}$  jsou jednotkové ztráty, vztažené na výšku přestupové plochy válce, kterou je v tomto případě zvolena výška kelímku  $h_k$ .

Při uvažování rovinné stěny je ztrátový výkon

$$P_{z,r,pl} = \frac{S_{stř} \cdot \Delta T_c}{\sum_i \frac{S_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{sv}}}. \quad (6.24)$$

V tomto případě označme jako tepelný odpor rovinné stěny<sup>ii</sup> jednotlivých vrstev

$$R_{ri} = \frac{S_i}{\lambda_i} \quad (6.25)$$

a celkový tepelný odpor s uvažováním konvekce při povrchu pláště

$$R_{rc} = \sum_i \frac{S_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{sv}}. \quad (6.26)$$

Ztrátový výkon je pak

$$P_{z,r,pl} = \frac{\Delta T_c}{R_{rc}} \cdot S_{stř} = P_{zj,r,pl} \cdot S_{stř}, \quad (6.27)$$

kde  $P_{zj,r,pl}$  jsou jednotkové ztráty, vztažené na střední přestupovou plochu válce, kterou určíme jako geometrický průměr vnitřní a vnější plochy

---

<sup>ii</sup> V práci jsou zavedeny dva typy tepelného odporu – tepelný odpor válcové stěny  $R_v$  a tepelný odpor rovinné stěny  $R_r$ . Obě veličiny jsou odvozeny z Fourierova zákona pro sdílení tepla vedením, avšak přímo je srovnávat nelze. Ze vztahu (6.21) vyplývá, že  $[R_v] = \text{m.K.W}^{-1}$ , zatímco  $[R_r] = \text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$  podle vztahu (6.25).

$$S_{stř} = \sqrt{S_{in} \cdot S_{out}} = 2\pi \cdot h_k \cdot \sqrt{r_{stř,sp} \cdot r_{out,pl}} \quad (6.28)$$

Pro zjištění teplot a teplotních spádů na jednotlivých vrstvách izolace vypočteme jednotlivé tepelné odpory vrstev [10], a to podle vztahů (6.21) a (6.25). Následující výpočet teplot bude stejný pro válcovou i rovinnou stěnu. Je patrné, že teplotní úbytek na vrstvě je přímo úměrný tepelnému odporu

$$\Delta T_i = \Delta T_c \cdot \frac{R_i}{R_c} \quad (6.29)$$

Z toho lze vypočítat teploty na jednotlivých rozhraních

$$T_{out,i} = T_{in,i} - \Delta T_i \quad (6.30)$$

a také střední teploty jednotlivých vrstev. Přestože průběhy teplot ve válcové stěně jsou logaritmické, pro výpočet středních teplot postačí aritmetický průměr

$$T_{stř,i} = \frac{T_{out,i} + T_{in,i}}{2} \quad (6.31)$$

### 6.3.2 Ztráty dnem a víkem

Uvažujme, že teplo prostupuje v axiálním směru dnem a víkem podle zákonitostí vedení tepla v rovinné stěně v souladu se vztahem (6.17). K výpočtu ztrát je tedy nutné znát teplotní spád ve stěně. To představuje v tomto případě problém, protože vnitřní teplota dna či víka v určitém bodě je závislá na vzdálenosti bodu od osy pece. Problém vyřešíme zjednodušeně tak, že určíme střední teplotu na vnitřní stěně dna a víka jako vážený průměr středních teplot vrstev v radiálním směru. Váhami budou plochy vrstev přiléhajících na víko, nebo na dno.

Teplota na vnitřním rozhraní dna pece je pak

$$T_{prům,d} = \frac{\sum_i S_{pūd,i} \cdot T_{stř,i}}{\sum_i S_{pūd,i}}, \quad (6.32)$$

kde  $S_{pūd,i}$  jsou obsahy ploch půdorysných průmětů jednotlivých vrstev pece. Jelikož uvažujeme válcový tvar pece, jedná se o obsahy mezikruží izolačních vrstev a obsah kruhového dna kelímku. Obsah jednotlivých vrstev je

$$S_{pūd,i} = \pi \cdot (r_{out,i}^2 - r_{in,i}^2), \quad (6.33)$$

kde pro obsah dna kelímku stačí do vztahu dosadit za vnitřní průměr  $r_{in,k}=0$ . Jako střední teplotu dna kelímku lze považovat například teplotu vnější stěny kelímku spočítanou v (6.11).

Celkový teplotní spád ve dně pece se s uvažováním průměrné teploty a teploty okolí vypočte analogicky jako v rovnici (6.19)

$$\Delta T_d = T_{prům,d} - T_0 \quad (6.34)$$

Pro ztrátový výkon dnem pece vyjdeme ze vztahu (6.17). Uvažujeme, že pec je postavena na pevném materiálu, který neodvádí teplo prouděním a má teplotu okolí. Tepelný odpor dna a následné ztráty určíme analogicky podle vztahů (6.24-6.27). S příslušným značením jsou ztráty

$$P_{z,d} = \frac{\Delta T_d}{\sum_i \frac{S_i}{\lambda_i}} \cdot S_d = \frac{\Delta T_d}{R_{rd}} \cdot S_d = P_{zj,r,d} \cdot S_d, \quad (6.35)$$

kde tepelný odpor rovinné stěny dna při uvážení dvou izolačních vrstev je

$$R_{rd} = \sum_i \frac{S_i}{\lambda_i} = \frac{S_{d1}}{\lambda_{d1}} + \frac{S_{d2}}{\lambda_{d2}}. \quad (6.36)$$

Ztráty víkem spočítáme obdobným způsobem jako ztráty dna s tím rozdílem, že je nutné uvážit proudění vzduchu nad víkem pece. Při určování průměrné teploty vnitřní stěny víka bude výpočet opět dosti zjednodušen. Za teplotu v prostoru nad vsázkou budeme považovat střední teplotu stěny kelímku. U ostatních vrstev vezmeme v potaz opět jejich střední teploty. Protože víko zasahuje nad vrstvu izolačních tvárníc jen částečně (viz příloha A), plocha přestupu tepla této vrstvy je menší než celá půdorysná plocha  $S_{pūd,i}$ . Zároveň je střední teplota překrývané části vyšší než střední teplota celé vrstvy  $T_{stř,it}$ . Střední teplota pod překryvem víka a třetí izolační vrstvy je

$$T_{stř,p-v} = T_{out,žv} - \frac{T_{out,žv} - T_{out,it}}{r_{in,it} - r_{out,it}} \frac{r_v - r_{in,it}}{2}, \quad (6.37)$$

průměrná teplota pod víkem pak jako vážený průměr

$$T_{prům,v} = \frac{\sum_i T_{stř,i} \cdot S_{pūd,i} + T_{stř,p-v} \cdot \pi \cdot (r_v^2 - r_{in,it}^2)}{S_v}, \quad (6.38)$$

kde  $S_v$  je obsah plochy víka. Teplotní spád se spočítá stejně jako v (6.34)

$$\Delta T_v = T_{prům,v} - T_0, \quad (6.39)$$

tepelný odpor víka o jedné izolační vrstvě s uvážením prouděním vzduchu je

$$R_{rv} = \frac{S_v}{\lambda_v} + \frac{1}{\alpha_v}, \quad (6.40)$$

kde  $\alpha_v$  je součinitel přestupu tepla při přirozené konvekci vzduchu nad víkem pece.

Tepelné ztráty víkem tedy jsou

$$P_{z,v} = \frac{\Delta T_v}{R_{rv}} \cdot S_v = P_{zj,r,v} \cdot S_v. \quad (6.41)$$

### 6.3.3 Celkový příkon

Celkové tepelné ztráty jsou součtem ztrát pláštěm, dnem a víkem

$$P_z = P_{pl} + P_d + P_v. \quad (6.42)$$

Příkon způsobující pouze ohřátí a roztavení vsázky se určí jako

$$P_{vs} = \frac{Q_{vs}}{t_{vs}}. \quad (6.43)$$

Příkon pokrývající ohřev vsázky včetně ztrát je pak

$$P_o = P_{vs} + P_z. \quad (6.44)$$

Tepelné ztráty je možné mimo výše popsaného analytického výpočtu určit odhadem. Ze zkušeností lze podle určitého paušálu odhadnout, o kolik procent je potřeba navýšit užitečný příkon  $P_{vs}$ . Příkon pro ohřev se v tomto případě vypočte jednoduše jako

$$P_o = \left(1 + \frac{p_z\%}{100}\right) \cdot P_{vs}, \quad (6.45)$$

kde  $p_z\% = q_z\%$  je odhadnutá procentní hodnota tepelných ztrát stejně jako ve vztahu (6.2).

Celkový příkon musí být z důvodu bezpečnosti a možných nepřesností navýšen o určitou rezervu – součinitel bezpečnosti podle vztahu (5.6)

$$P_c = k_B \cdot P_o. \quad (6.46)$$

## 6.4 Návrh topného systému

Z výsledků předchozích dvou částí – provozní teploty spirál a příkonu pece – se vychází v návrhu topného systému. Podle teploty byl vybrán odporový drát Kanthal (feritická slitina, viz kap. 3.4.3). Dále je potřeba stanovit uspořádání topných článků v peci a na základě výpočtu zvolit průměr drátu.

Pro vybraný materiál se z tabulek výrobce (viz příloha D) odečte jeho rezistivita při 20 °C a pomocí koeficientu  $c_T$  se přepočítá na provozní teplotu

$$\rho_g = \rho_{20} \cdot c_T. \quad (6.47)$$

Nejdůležitějším parametrem topného článku je povrchové zatížení  $p_z$ , které musíme vhodně zvolit. Výrobci uvádějí různé hodnoty povrchového zatížení článku, a to v závislosti na materiálu, teplotě nebo průměru drátu. Pro vybraný drát Kanthal lze zvolit doporučenou hodnotu  $p_z$  z grafu uvedeného v příloze B [11]. V grafu je zobrazena závislost povrchového zatížení článku na teplotě pro čtyři různá uspořádání. Jak bylo řečeno, topný drát bude tvořit spirálu, která bude umístěna na keramických nosících kolem kelímku. Tomuto uspořádání odpovídá v grafu křivka „d“.

Z ekvivalence Jouleova tepla, které vzniká v drátu průchodem proudem, a tepla, které je drát svým povrchem schopen odvést, se vypočte průměr drátu podle (5.13)

$$d_{poc} = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi^2} \left( \frac{P_{1f}}{U} \right)^2 \frac{\rho_g}{p_z}}, \quad (6.48)$$

kde  $P_{1f}$  je příkon připadající na jednu fázi,  $U$  je napětí na jedné fázi a  $p_z$  je zvolená hodnota povrchového zatížení. V případě třífázového zapojení je  $P_{1f}$  třetina celkového příkonu  $P_c$  a napětí  $U$  závisí na zapojení článků – do hvězdy, nebo do trojúhelníka.

Pro skutečný návrh se zvolí nejbližší vyšší průměr drátu  $d_{zv}$  z nabídky výrobce (viz příloha D).

Pro délku drátu na jednu fázi platí vztah

$$L_{1f} = \frac{\pi U^2 d_{zv}}{4 P_{1f} \rho_g} \quad (6.49)$$

a celková délka drátu je pro tři fáze

$$L_{clk} = 3 \cdot L_{1f} \cdot \quad (6.50)$$

Z definice povrchového zatížení lze provést jeho kontrolu pro navržený vodič. Hodnota

$$p_{skut} = \frac{P_{1f}}{\pi \cdot d_{zv} \cdot L_{1f}} \quad (6.51)$$

musí být menší než jmenovitá hodnota povrchového zatížení drátu. Jelikož v případě tohoto příkladu se povrchové zatížení volí s dostatečnou rezervou podle [11], ověření není nutné.

Dále je potřeba navrhnout spirálu. Podle [11] se volí stoupání spirály  $s_{zv}$  v rozsahu 2 až 3 násobku průměru drátu, průměr spirály  $D_{zv}$  se volí jako 5 až 8 násobek (viz příloha C). Délka jednoho závitu spirály  $L_{1z}$  se pak spočítá jednoduše pomocí Pythagorovy věty

$$L_{1z} = \sqrt{s_{zv}^2 + [\pi(D_{zv} - d_{zv})]^2}. \quad (6.52)$$

Délka nosíkového žlabu, ve kterém je umístěna spirála závisí pouze na konstrukci pece. Pro válcovitý tvar kelímku se středním průměrem  $d_{sk}$ , tloušťkou kelímku  $s_k$  a vzdáleností středu žlabu od kelímku  $s_\Delta$  je délka jednoho žlabu

$$L_z = \pi(d_{sk} + 2 \cdot s_k + 2 \cdot s_\Delta). \quad (6.53)$$

Podělením délky jednoho žlabu  $L_z$  stoupáním spirály  $s_{zv}$  vypočteme počet závitů v jednom žlabu

$$n_{z1z,poc} = \frac{L_z}{s_{zv}}, \quad (6.54)$$

který je třeba zaokrouhlit na celé číslo. Zaokrouhlit se může nahoru i dolů – buď se spirála nepatrně natáhne, nebo zmáčkne.

Délka drátu v jednom žlabu je pak součinem celočíselného počtu závitů  $n_{z1z}$  a délky jednoho závitu  $L_{1z}$

$$L_{d1z} = n_{z1z} \cdot L_{1z}. \quad (6.55)$$

Nutné je také určit počet nosníkových žlabů pece. Z konstrukčních důvodů zapojení topných článků se uvažuje pouze celočíselný počet nosníků na jednu fázi. Počet nosníků na jednu fázi je

$$N_{z1f,poč} = \frac{L_{1f}}{L_{d1z}}. \quad (6.56)$$

Celočíselné zaokrouhlení počtu nosníkových žlabů na jednu fázi  $N_{z1f}$  vyvolá změnu parametrů topné spirály. Proto je nutné vhodně zkombinovat volby parametrů a následné zaokrouhlování výsledků tak, aby změněné parametry příliš nevybočovaly z doporučených mezí.

Pro přepočítání stoupání spirály na novou hodnotu lze odvodit vztah

$$s_n = \frac{\pi(D_{zv} - d_{zv})}{\sqrt{\left(\frac{L_{1f}}{N_{z1f} \cdot L_z}\right)^2 - 1}}. \quad (6.57)$$

Dále podle vztahů (6.52), (6.54) a (6.55) přepočteme délku jednoho závitu spirály  $L_{1z}$ , počet závitů v jednom žlabu  $n_{z1z}$  a délku drátu v jednom žlabu  $L_{d1z}$  na nové hodnoty  $L_{1z,n}$ ,  $n_{z1z,n}$  a  $L_{d1z,n}$ .

Z celkového počtu nosníků pro tři fáze lze poté navrhnout (případně zkontrolovat) výšku nosníku  $h_n$  v souvislosti s výškou kelímku. Protože je žádoucí umístit topné spirály pouze do úrovně hladiny vsázky, výška nosníku se v souladu s nákresem pece (viz příloha A) navrhne jako

$$h_n = \frac{h_{vs} + s_k}{3 \cdot N_{z1f}}. \quad (6.58)$$

## 6.5 Akumulované teplo, doba náběhu a tepelná účinnost

Při určování ztrát a celkového příkonu se uvažoval ustálený stav, kde různé části pece měly příslušné střední teploty. Na vyhřátí jednotlivých částí na tyto teploty je potřeba dodat do zařízení další množství tepla – akumulované teplo  $Q_{ak}$ .

Předpokládejme, že po zapnutí pece se začnou vyhřívat všechny konstrukční prvky a pec za určitou dobu naběhne do zahřátého stavu. Množství tepla, které se akumuluje v jednotlivých částech, vypočteme pomocí kalorimetrické rovnice. Pro výpočet je nutné znát rozměry všech uvažovaných částí, jejich hustotu a měrnou tepelnou kapacitu. Jako počáteční teplotu budeme považovat teplotu okolí, konečnými teplotami budou střední teploty vypočtené podle vztahu (6.31). Geometrie pece bude do jisté míry idealizovaná a bude odpovídat nákrese v příloze A. Uvažované části pece mají tvar plného nebo dutého válce.

Pro objem válce platí

$$V = h \cdot \pi \cdot r^2 \quad (6.59)$$

a pro objem dutého válce platí

$$V = h \cdot \pi \cdot (r_{out}^2 - r_{in}^2). \quad (6.60)$$

Kombinací těchto dvou vztahů lze vypočítat všechny uvažované objemy. Jako příklad uveďme výpočet objemu stěn kelímku a objemu keramických nosníků. Objem stěn kelímku je součet objemu pláště kelímku a jeho dna, tedy dutého a plného válce

$$V_k = h_k \cdot \pi \cdot (r_{out,k}^2 - r_{in,k}^2) + s_k \cdot \pi \cdot r_{in,k}^2. \quad (6.61)$$

Pro výpočet objemu nosníků vyjdeme ze zjednodušeného nákresu (příloha A), kde má v řezu nosník tvar „L“ zabírající tři čtvrtiny plného obdélníku. Nosníky dosahují pouze do výšky vsázky, jejich celkový objem tedy

$$V_n = \frac{3}{4} (h_{vs} + s_k) \cdot \pi \cdot (r_{out,n}^2 - r_{in,n}^2). \quad (6.62)$$

Akumulované teplo v jedné části je

$$Q_{ak,i} = m_i \cdot c_{qi} \cdot \Delta T_i = \rho_{hi} \cdot V_i \cdot c_{qi} \cdot (T_{stř,i} - T_0), \quad (6.63)$$

celkové akumulované teplo je

$$Q_{ak} = \sum_i Q_{ak,i}, \quad (6.64)$$

kde  $i$  jsou indexy značící uvažované části pece, jimiž jsou při zjednodušeném konstrukčním modelu: kelímek, spirály, keramické nosníky, žáruvzdorná vyzdívka, izolační tvárnice, ocelový plášť, víko a dvě izolační vrstvy dna (viz příloha A).

Doba náběhu pece se určí jako podíl celkového akumulovaného tepla a příkonu, který ho vytvoří. Proces nahřívání pece je také doprovázen tepelnými ztrátami do okolí. Velikost ztrát je přímo úměrná teplotnímu rozdílu pece a okolí (viz např. vztah 6.20). Teplotní spád se při nahřívání pece zvyšuje, čímž se zvyšují i tepelné ztráty. Ty se po náběhu pece ustálí na hodnotě ztrát zahřáté soustavy  $P_z$ . Pokud časovou závislost ztrát pro zjednodušení zanedbáme a budeme uvažovat konstantní ztráty  $P_z$  po celou dobu provozu, bude doba náběhu

$$t_n = \frac{Q_{ak}}{P_c - P_z}. \quad (6.65)$$

Celková doba procesu od studeného stavu po roztavení a zahřátí vsázky je součtem doby náběhu a doby tavení

$$t_c = t_n + t_{vs}. \quad (6.66)$$

Tepelná účinnost vyjadřuje schopnost pece efektivně využít teplo vzniklé elektrotepelnou přeměnou. Určí se jako poměr užitečného tepla (tepla potřebného na tavicí proces) a tepla celkově přivedeného. V souvislosti s náběhem pece lze definovat dva typy účinností. Jedna se

vztahuje k počátečnímu stavu již naběhnuté pece, druhá počítá s počátečním stavem, kdy všechny části pece mají teplotu okolí. Označme první typ účinnosti jako účinnost za tepla  $\eta_t$  a druhý typ jako účinnost ze studeného stavu  $\eta_s$

$$\eta_t = \frac{Q_{vs}}{P_c \cdot t_{vs}}, \quad (6.67)$$

$$\eta_s = \frac{Q_{vs}}{P_c \cdot t_c}. \quad (6.68)$$



## 7 Výpočetní program

Pro tepelný výpočet kelímkové odporové pece provedený v kapitole 6 byl sestaven výpočetní program v tabulkovém kalkulátoru Microsoft Office Excel<sup>®</sup>. Na základě vstupních hodnot, jejichž pole jsou v programu zvýrazněna žlutě, přepočítává program zbylá pole podle příslušných vztahů. Jako výsledky může uživatel považovat libovolné veličiny, a to podle účelu výpočtu. Přímý zásah uživatele do výpočtu není nutný, je však třeba zadávat materiálové vlastnosti, rozměry a doporučené koeficienty podle firemní a odborné literatury. Program je rozčleněn do šesti mezi sebou provázaných listů, z nichž každý se týká určité problematiky.

Hlavní list ‚výpočet‘ je rozdělen do pěti částí korespondujících s kapitolami 6.1 až 6.5 a takřka kopíruje postup celého tepelného výpočtu. Do výpočtu může v průběhu uživatel zasahovat, a to pomocí přepínačů a číselníků, případně přímým vepsáním hodnoty. Číselníky lze nastavovat různé koeficienty a procentní navýšení, jako je například koeficient plnění, součinitel bezpečnosti, odhad ztrát aj. Pomocí přepínačů lze vybírat mezi způsobem výpočtu vedení tepla – rovinnou či válcovou stěnou, mezi způsobem určení tepelných ztrát – odhadem či výpočtem a mezi zapojením článků do trojúhelníka nebo do hvězdy. Přímým vepsáním se mění hodnota povrchového zatížení, která se může odečíst z grafu, nebo zjistit z doporučení výrobce. U některých veličin je pro lepší představu uveden výsledek i v alternativních, nebo násobných jednotkách.

Výpočet tepelných ztrát je kvůli své rozsáhlosti proveden ve zvláštním listu ‚ztráty‘. Ten je rozdělen na výpočet ztrát pláštěm, víkem a dnem, stejně jako v kapitole 6.3. Zde je možno sledovat odchylku výpočtu ztrát pro rovinnou a válcovou stěnu.

V listu ‚vsázka‘ jsou shrnuty vlastnosti materiálu vsázky, kterým je v tomto případě hliník. Univerzální fyzikální konstanty potřebné k výpočtu jsou uvedeny v listu ‚fyz. konst.‘.

Konstrukce a rozměry kelímkové pece jsou shrnuty v listu ‚pec‘. Sloupce představují dílčí uvažované části pece a řádky vstupní a výstupní veličiny. Uživatel může měnit tloušťku jednotlivých vrstev, jejich tepelnou vodivost, hustotu a měrnou tepelnou kapacitu. U kelímku a topných spirál se vyžaduje součinitel sálání (kvůli určení teploty spirál). U víka pece lze měnit jeho průměr v rozmezí vnitřního a vnějšího průměru 3. izolační vrstvy. Dalšími vstupními daty jsou součinitele přestupu tepla pro přirozenou konvekci vzduchu na vnějším povrchu pece a poloha uložení topné spirály. Jako výstupní veličiny lze brát dopočítané rozměry, tepelné odpory, rozložení tepelných spádů, střední teploty a akumulovaná tepla. Výsledky rozložení teplot jsou provedeny pro rovinou i válcovou stěnu, tudíž je možno obě varianty výpočtu porovnat. Tepelné odpory válcové a rovinné stěny ale porovnat nelze, neboť vycházejí z jiných vztahů (viz kap. 6.3) a mají jinou jednotku.

List ‚topné články‘ obsahuje informace o použitém materiálu topných článků. Program podle vypočtené teploty spirál najde v tabulce příslušný koeficient přepočtu rezistivity a použije ho v návrhu průměru drátu. Podle vypočteného průměru je následně automaticky vybrán nejbližší vyšší z tabulky normalizované řady průměrů.

Podoba výpočetního programu je na obrázku 7-1, kde je zachycena část hlavního listu. V programu je vždy veličina pojmenována slovně, označena příslušným symbolem, doplněna hodnotou a jednotkou. Hodnoty jsou v buňkách vyčísleny na zvolený počet desetinných míst.

26	<b>Výpočet tepelných ztrát a celkového příkonu</b>				
27	příkon na ohřátí vsázky	$P_{vs}$	13979,17	W	
28					určení ztrát <input checked="" type="radio"/> výpočet <input type="radio"/> odhadem
29			výpočet	procentní odhad	
30	ztráty pláštěm	$P_{zpl}$	1375,14	W	20 %
31	ztráty dnem	$P_{zd}$	915,05	W	
32	ztráty víkem	$P_{zv}$	727,97	W	
33	ztráty pláštěm, dnem a víkem	$P_z$	3018,16	W	2795,83 W
34	příkon včetně ztrát	$P_o$	16997,33	W	
35	součinitel bezpečnosti	$k_B$	1,1		
36	celkový příkon	$P_c$	18697,06	W	
37					
38	<b>Návrh topného systému</b>				
39	rezistivita při provozní teplotě	$\rho_\theta$	1,508E-06	$\Omega.m$	
40	napětí na 1 fázi D/Y	$U$	400	V	
41	povrchové zatížení	$\rho_z$	4,00	$W.cm^{-2}$	4,00E+04 $W.m^{-2}$
42	vypočítaný průměr	$d_{poč}$	0,00155	m	1,55 mm
43	zvolený průměr	$d_{zv}$	0,00160	m	1,60 mm
44	délka na jednu fázi	$L_{if}$	34,23	m	
45	celková délka tří fází	$L_{clk}$	102,69	m	
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <span>&lt; &gt;</span> <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">výpočet</span> <span>ztráty</span> <span>vsázka</span> <span>pec</span> <span>topné články</span> <span>fyz. konst</span> <span>+</span> </div>					

Obrázek 7-1: Výpočetní program

## 8 Příklad výpočtu

Výpočet popsáný v kapitole 6 bude demonstrován na příkladu s konkrétním číselným zadáním, přičemž bude využit sestavený výpočetní program.

### 8.1 Zadání - vstupní parametry

Pro výpočet v návrhu kelímkové pece se bude vycházet z předpokladů uvedených v kapitole 6.1, vstupní veličiny se zvolenými hodnotami jsou uvedeny v následujících tabulkách. V tabulce 8-1 jsou shrnuty hodnoty veličin použitých ve výpočtu, v tabulce 8-2 jsou uvedeny zvolené možnosti na přepínačích v programu, které určují způsob dílčích výpočtů a v tabulce 8-3 jsou shrnuty rozměry a materiálové vlastnosti částí pece, které jsou převzaty z [3].

Tabulka 8-1: Výchozí hodnoty pro výpočet

veličina	značka	jednotka	hodnota	poznámka
hmotnost vsázky	$m_{vs}$	kg	50	
teplota přehřátí vsázky	$\vartheta_{vs}$	°C	710	
střední průměr kelímku	$d_{sk}$	m	0,3	viz příloha A
doba tavení	$t_{vs}$	h	1	
teplota okolí	$\vartheta_0$	°C	25	
počáteční odhad ztrát	$q_z$	%	20	
koeficient plnění	$k_{pln}$	%	40	podle [3]
navýšení kelímku nad vsázku	$h_{k\%}$	%	8	
součinitel bezpečnosti	$k_B$	-	1,1	
povrchové zatížení	$p_z$	W.cm <sup>-2</sup>	4,0	viz příloha B
vnější průměr spirály	$D_{zv}$	· $d_{zv}$	6	viz příloha C
stoupání spirály	$s_{zv}$	· $d_{zv}$	2	viz příloha C
navýšení akumulovaného tepla	$q_{ak,prid}$	%	2	
průměr víka	$d_v$	mm	940	viz příloha A
součinitel vyzařování spirál	$c_{sp}$	W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup>	$3,97 \cdot 10^{-8}$	podle [11]
součinitel vyzařování kelímku	$c_k$	W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup>	$5,41 \cdot 10^{-8}$	podle [3]
součinitel přestupu tepla - plášť	$\alpha_{pl}$	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	25	
součinitel přestupu tepla - víko	$\alpha_v$	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	25	
vzdálenost kelímek - nosník	$s_{k-n}$	mm	30	viz příloha A
vzdálenost nosník - střed spirály	$s_{n-s}$	mm	23	viz příloha A

**Tabulka 8-2: Zvolené možnosti přepínačů**

přepínač	zvolená možnost	nezvolená možnost
vedení tepla v kelímku	válcová	rovinná
vedení tepla v plášti pece	válcová	rovinná
určení ztrát	výpočtem	procentním odhadem
zapojení topných článků	trojúhelník, $U=400$ V	hvězda, $U=230$ V

**Tabulka 8-3: Vlastnosti částí pece**

část pece	tloušťka (viz příloha A)	tepelná vodivost	hustota	měrná tepelná kapacita
	$s$	$\lambda$	$\rho_h$	$c_q$
	mm	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
kelímek	20	46,4	7250	550
spirály Kanthal	-	-	7100	460
nosníky	70	1	2650	830
žár. vyzdívka	100	0,85	2450	650
iz. tvárnice	190	0,581	900	630
ocelový plášť	5	54,7	7850	470
víko	300	0,7	2450	650
1. vrstva dna	100	0,85	2450	650
2. vrstva dna	180	0,581	900	630

Jako topné články jsou použity dráty Kanthal A-1, jejichž nominální vlastnosti jsou v příloze D.

## 8.2 Vybrané výstupy

Jako výsledky výpočtu lze považovat především příkon pece, parametry topné spirály, návrh výšky nosníku a jejich počet, dobu náběhu a tepelnou účinnost pece. Vybrané výstupní veličiny jsou shrnuty v tabulce 8-4.

**Tabulka 8-4: Výstupní hodnoty výpočtu**

veličina	značka	jednotka	hodnota	poznámka
teplota spirál	$\vartheta_{sp}$	°C	933,14	
příkon	$P_c$	W	18 697,06	
ztráty	$P_z$	W	3 018,16	
počet nosníků	$N_{\dot{z}}$	-	12	$N_{zlf} = 4$
výška nosníku	$h_n$	mm	32	vyhovuje ( $h_n < D_{zv}$ )
<i>topná spirála</i>				
průměr drátu	$d_{zv}$	mm	1,60	
délka drátu	$L_{clk}$	m	102,69	$L_{lf} = 34,23$ m
délka drátu na žlab	$L_{dlz,n}$	m	8,56	
počet závitů na žlab	$n_{zlf,n}$	-	336	
délka závitu	$L_{lz,n}$	mm	25,48	
stoupání	$s_n$	mm	4,2	
akumulované teplo	$Q_{ak,clk}$	MJ	327,94	
doba náběhu	$t_n$	h	5,54	
celková doba 1 cyklu	$t_c$	h	6,54	
účinnost zahřáté pece	$\eta_t$	%	74,77	
účinnost ze studena	$\eta_s$	%	11,43	

### 8.3 Srovnání výpočtu s parametry katalogové pece

Výsledky číselného výpočtu můžeme nyní porovnat s nějakou existující kelímkovou pecí. V katalogu firmy BVD pece spol. s r. o. [4] je uvedena kelímková pec pro tavení hliníku a mědi CCM 45-12 se základními parametry:

- obsah Al: 45 kg,
- vnější rozměry (š. x dl. x v.): 950 x 950 x 800 mm,
- výkon: 21 kW,
- rychlost tavení: 42 kg.h<sup>-1</sup>.

Dopočteme-li z výstupů výpočetního programu vnější rozměry pece, konkrétně vnější průměr pece jako

$$d_{out,pec} = 2 \cdot r_{out,pl} \quad (8.1)$$

a výšku pece jako

$$h_{pec} = s_{d1} + s_{d2} + h_k + s_v, \quad (8.2)$$

můžeme porovnat pec vypočítanou a pec z katalogu. Do předchozích dvou vztahů dosadíme číselně v milimetrech

$$d_{out,pec} = 2 \cdot 565 \text{ mm} = 1130 \text{ mm}, \quad (8.3)$$

$$h_{pec} = 0,1 \text{ mm} + 0,18 \text{ mm} + 0,42 \text{ mm} + 0,3 \text{ mm} = 1000 \text{ mm}. \quad (8.4)$$

Parametry obou pecí jsou shrnuty v tabulce 8-5. Lze usoudit, že pec, která byla předmětem výpočtu, je svými parametry podobná té z katalogu. Při vzájemně srovnatelných rozměrech obsáhnou obě pece podobné množství hliníkové vsázky, kterou roztaví podobně rychle. Příkony obou pecí jsou také srovnatelné. Rozdíly jsou způsobeny odlišnými konstrukcemi, použitými materiály a v neposlední řadě způsobem výpočtu a použitými zjednodušeními. Přes tyto odchylky, které nepřesahují 20 %, lze považovat výpočet pece za reálný.

**Tabulka 8-5: Srovnání parametrů vypočítané pece a pece z katalogu**

	vypočítaná pec	pec CCM 45-12
obsah Al (kg)	50	45
příkon (kW)	18,7	21
vnější rozměry (mm)	Ø1130 x 1000	950 x 950 x 800
rychlost tavení (kg.h <sup>-1</sup> )	50	42

## 9 Závěr

Práce byla zaměřena na tepelný výpočet odporových a indukčních zařízení. Mimo provedení vlastního výpočtu bylo úkolem také uvedení souvisejících poznatků. Teoretická část se proto věnovala základům elektrotepelné techniky, popisu odporových a indukčních tepelných zařízení a základům tepelných výpočtů. Popsány byly všechny tři způsoby sdílení tepla, včetně matematického vyjádření fyzikálních zákonů. Principy popisující sdílení tepla tvoří spolu s kalorimetrickou rovnicí skutečné základy pro tepelné výpočty všeho druhu. Odporový ohřev má díky své univerzálnosti nejširší oblast uplatnění, což dokazuje bohatý výčet jeho aplikací. Indukční elektrotepelná zařízení lze použít pouze pro ohřev elektricky vodivé vsázky. Jednou z výhod takových zařízení je například možnost povrchové úpravy kovů.

Tepelný výpočet v návrhu elektrotepelných zařízení závisí na mnoha faktorech, které se odvíjejí od konkrétního typu zařízení. Ať už jde o zařízení odporová, či indukční, tepelný výpočet vychází ze stejných fyzikálních principů. Proto se v práci řešil pouze výpočet odporového zařízení, konkrétně odporové kelímkové pece na tavení hliníku.

Vlastní tepelný výpočet se vztahoval na odporovou kelímkovou pec o známé konstrukci, jejíž zjednodušený náčrt v řezu je v příloze A. Kromě známých rozměrů pece a jejích dílčích částí byly výchozími parametry výpočtu také materiálové vlastnosti jednotlivých částí, množství vsázky, požadovaná doba tavení a požadovaná teplota přehřátí (viz kap. 6.1). Doplňkové vstupní údaje byly přebírány z odborné a firemní literatury. Cílem tepelného výpočtu bylo především systém topných článků, určit elektrický příkon, tepelnou účinnost a celkovou dobu práce. Při návrhu topného systému byly použity topné články Kanthal, které jsou ve formě spirál umístěny v nosnících kolem kelímku. Katalogové údaje o topných člancích jsou v přílohách B, C a D.

Cílem práce bylo také zautomatizovat výpočet pomocí počítačového programu. Toho bylo dosaženo v rozhraní aplikace Microsoft Office Excel<sup>®</sup>. Sestavený výpočetní program na základě vstupních parametrů přepočítává výstupní hodnoty přesně podle schématu analytického výpočtu. Uživatel může podle konkrétního příkladu zadávat vstupní hodnoty (příp. volit mezi způsoby výpočtu) a odečítat výsledky výpočtu nebo sledovat jejich změny. Program přehledně zobrazuje všechny potřebné veličiny a šetří čas při číselném výpočtu pece.

Pomocí sestaveného programu byl proveden příklad výpočtu pro jedno konkrétní zadání. Vstupní hodnoty pro výpočet jsou shrnuty v tabulkách 8-1 až 8-3. Vybrané výstupní hodnoty výpočtu jsou uvedeny v tabulce 8-4. Pro příklad výpočtu bylo provedeno srovnání s podobnou existující pecí z katalogu české firmy BVD pece spol. s r. o. Srovnání základních parametrů obou pecí je v tabulce 8-5. Ze srovnání lze posoudit, že pec počítaná pracuje s vyšší účinností než pec katalogová, protože s menším příkonem roztaví větší množství vsázky. Rozdíly parametrů obou pecí tkví v odlišné konstrukci a v provedení výpočtu, kde jde zejména o rozsahy volených hodnot a o zavedená zjednodušení.

## Použitá literatura

- [1] ACHESON, E. G. *Manufacture of Graphite*, U. S. Patent 568,323, vydáno 29. 9. 1896. Dostupné také z: [www.google.com/patents/US568323](http://www.google.com/patents/US568323)
- [2] BAXANT, Petr, Jiří DRÁPELA a Ilona LÁZNIČKOVÁ. *Elektrotepelná technika*. Brno: VUT v Brně. Elektronická skripta pro předmět Elektrotepelná technika na FEKT VUT v Brně.
- [3] BAXANT, Petr. *Elektrické teplo a světlo*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 190 s. ISBN 80-214-2761-2.
- [4] BVD PECE [online]. *Pece pro kovozpracující průmysl*. Sadov: BVD PECE. [cit. 2016-05-01]. Dostupné také z: <http://www.bvd.cz/share/download/15.pdf>
- [5] FANDERLIK, Milota. Tavení skla kdysi, dnes a v budoucnu. *Chemické zvesti*. Bratislava: Spolok chemikov Slovákov, 1984. Dostupné také z: [http://www.chempap.org/file\\_access.php?file=41a14.pdf](http://www.chempap.org/file_access.php?file=41a14.pdf)
- [6] HRADÍLEK, Zdeněk a kolektiv, *Elektrotepelná technika: simulace - počítačové programy*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2001, 192 s. ISBN 80-707-8874-7.
- [7] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [8] HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektrické teplo*. Ostrava: VŠB Ostrava, 1979.
- [9] Chamber furnace. In: *Industrial Furnace And Controls* [online]. Industrial furnaces 2013.[cit. 2015-11-19]. Dostupné z: <http://indfurnace.com/images/cf1.jpg>
- [10] KANTHAL. *Electric Heating Element Handbook*. Hallstahammar (Švédsko): Sandvik heating technology AB, 1999. Dostupné také z: <http://mtixtl.com/machineflyer/Handbook.pdf>
- [11] KANTHAL. *Resistance heating alloys and systems for industrial furnaces*. Hallstahammar, Švédsko: Sandvik heating technology AB, 2011. Dostupné také z: [http://www.kanthal.com/Global/Downloads/Furnace%20products%20and%20heating%20systems/Heating%20elements/Metallic%20heating%20elements/S-KA041-B-ENG\\_2011-09.pdf](http://www.kanthal.com/Global/Downloads/Furnace%20products%20and%20heating%20systems/Heating%20elements/Metallic%20heating%20elements/S-KA041-B-ENG_2011-09.pdf)
- [12] KANTHAL. *Resistance heating alloys for electric home appliances*. Hallstahammar, Švédsko: Sandvik heating technology AB, 2012. Dostupné také z: <http://www.kanthal.com/Global/Downloads/Materials%20in%20wire%20and%20strip%20form/Resistance%20heating%20wire%20and%20strip/S-KA026-B-ENG-2012-01.pdf>
- [13] LANGER, Emil a Jiří KOŽENÝ. *Elektrotepelná zařízení indukční: základy teorie, výpočty a konstrukce*. Plzeň: Vysoká škola strojní a elektrotechnická, 1982.



- [14] MACHÁČKOVÁ, Adéla a Lenka MRŇKOVÁ. *Průmyslové pece*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2013.
- [15] NOVÁK, Pavol a Juraj KOLESÁR. *Elektrotepeľná technika*. 1. vyd. Bratislava: ALFA, 1988, ISBN 80-05-00426-5.
- [16] NOVÁK, Pavol a Juraj KOLESÁR. *Elektrotepeľná technika: návody na cvičenia*. Košice, 1988.
- [17] PETRÁNEK, Jan. Grafitizace. On-line Geologická Encyklopedie [online]. Česká geologická služba, 2007 [cit. 2015-11-17].  
Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?grafitizace>
- [18] Planck black body. In: *Chapter 18: Planckian sources and color temperature* [online]. Rensselaer Polytechnic Institute 1994. [cit. 2016-04-22].  
Dostupné z: <https://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap18/F18-02%20Planck%20black%20body.jpg>
- [19] PLCH, Jiří. *Elektrické teplo*. SNTL, 1984.
- [20] RADA, Josef a kol. *Elektrotepeľná technika*. Praha: SNTL, 1985.
- [21] Scheme of the multipurpose chamber furnace. In: *Industrial Heating | Thermal processing technical journal covering heat treating, & ferrous & nonferrous thermal processes in excess of 1000 degrees F*. [online]. BNP Media 2015.[cit. 2015-11-19].  
Dostupné z:  
<http://www.industrialheating.com/ext/resources/IH/2003/09/Files/Images/88387.jpg>
- [22] ŠTOLL, Ivan. *Fyzika pro gymnázia: Fyzika mikrosvěta*. Praha: Prometheus, 2006. ISBN 80-7196-241-4.

## **SEZNAM PŘÍLOH**

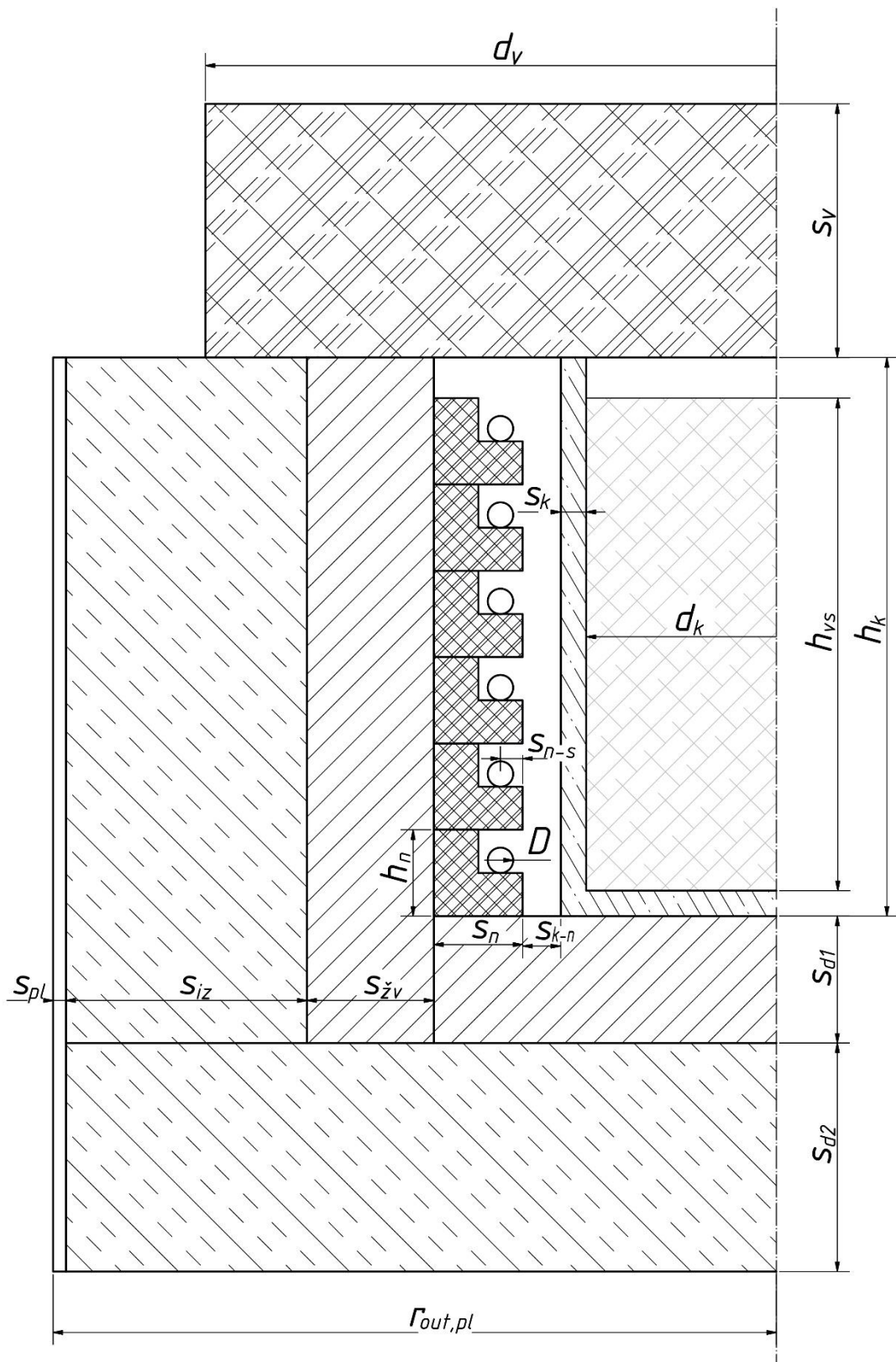
**Příloha A Zjednodušený nákres kelímkové pece**

**Příloha B Povrchové zatížení drátů KANTHAL**

**Příloha C Parametry topné spirály KANTHAL**

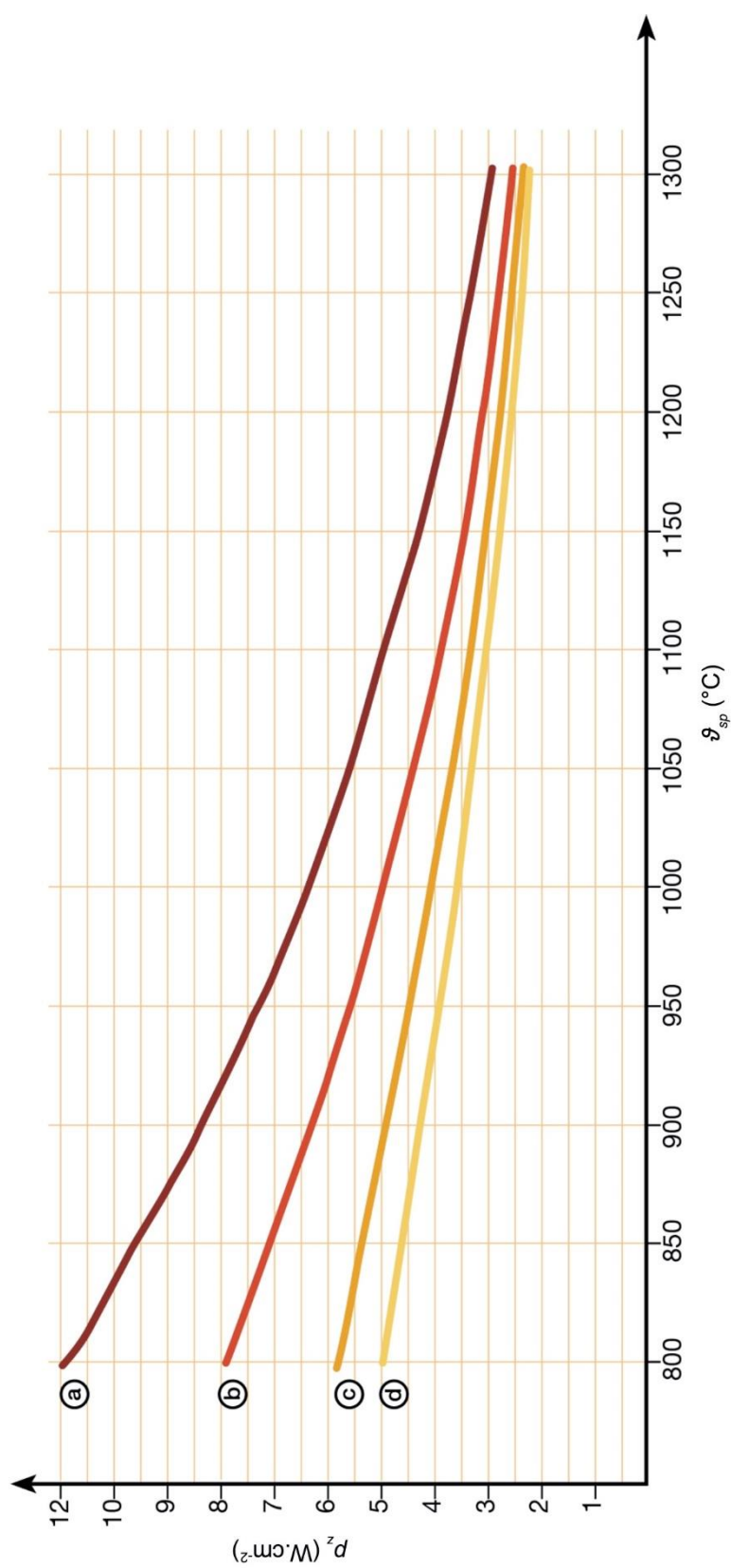
**Příloha D Katalogový list drátů KANTHAL**

**Příloha A Zjednodušený nákres kelímkové pece**



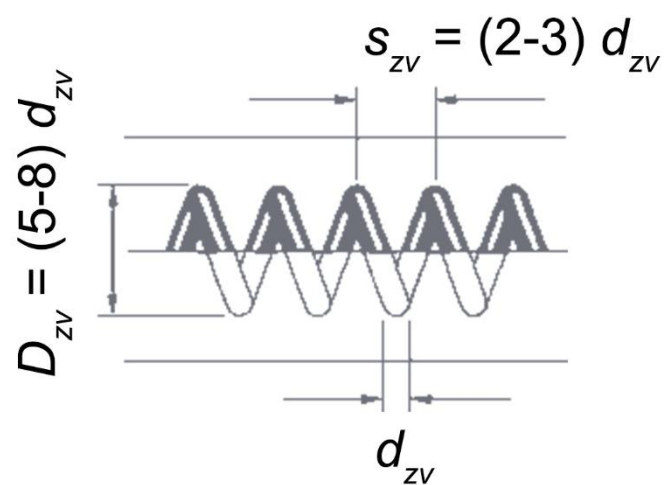
**Obrázek A-1: Zjednodušený nákres kelímkové pece v řezu**

## Příloha B Povrchové zatížení drátů KANTHAL



**Obrázek B-1: Závislost zvoleného povrchového zatížení na teplotě pece [11]**  
*a* – meandrovitě tvarovaný drát, *b* – meandrovitě tvarovaný pás, *c* – spirála na keramické trubce,  
*d* – spirála v drážce nosníku

## Příloha C Parametry topné spirály KANTHAL



Obrázek C-1: Topná spirála s doporučenými rozsahy parametrů [11]

## Příloha D Katalogový list drátů KANTHAL

Tabulka D-1: Řada nominálních průřezů drátů Kanthal A-1 a APM s jejich dalšími vlastnostmi [12]

### Wire dimensions and properties

Resistivity 1.45  $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$  (872  $\Omega/\text{cmf}$ ). Density 7.10  $\text{g}/\text{cm}^3$  (0.256  $\text{lb}/\text{in}^3$ ).

To obtain resistivity at working temperature, multiply by factor  $C_t$  in following table.

$^{\circ}\text{C}$	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
$C_t$	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

Diameter, mm		Resistance at 20°C $\Omega/\text{m}$	Resistivity at 20°C $\text{cm}^2/\Omega^*$	Weight g/m	Surface area $\text{cm}^2/\text{m}$	Cross sectional area $\text{mm}^2$
Kanthal® A-1	Kanthal APM™					
10.0	10.0	0.0185	17017	558	314	78.5
9.5	9.5	0.0205	14590	503	298	70.9
	9.27	0.0215	13555	479	291	67.5
8.25	8.25	0.0271	9555	380	259	53.5
8.0	8.0	0.0288	8713	357	251	50.3
7.35	7.35	0.0342	6757	301	231	42.4
7.0	7.0	0.0377	5837	273	220	38.5
6.54		0.0432	4760	239	205	33.6
6.5	6.5	0.0437	4673	236	204	33.2
6.0	6.0	0.0513	3676	201	188	28.3
5.83		0.0543	3372	190	183	26.7
5.5	5.5	0.0610	2831	169	173	23.8
5.0	5.0	0.0738	2127	139	157	19.6
4.75	4.75	0.0818	1824	126	149	17.7
4.62		0.0865	1678	119	145	16.8
4.5	4.5	0.0912	1551	113	141	15.9
4.25	4.25	0.102	1306	101	134	14.2
4.11		0.109	1181	94.2	129	13.3
4.06		0.112	1139	91.9	128	12.9
4.0	4.0	0.115	1089	89.2	126	12.6
3.75	3.75	0.131	897	78.4	118	11.0
3.65		0.139	827	74.3	115	10.5
3.5	3.5	0.151	730	68.3	110	9.62
3.35		0.165	640	62.6	105	8.81
3.25	3.25	0.175	584	58.9	102	8.30
3.2		0.180	558	57.1	101	8.04

**Tabulka D-2: Řada nominálních průřezů drátů Kanthal A-1 a APM s jejich dalšími vlastnostmi [12]  
(pokračování)**

Diameter, mm		Resistance at 20°C Ω/m	Resistivity at 20°C cm <sup>2</sup> /Ω*	Weight g/m	Surface area cm <sup>2</sup> /m	Cross sectional area mm <sup>2</sup>
Kanthal® A-1	Kanthal APM™					
3.0	3.0	0.205	459	50.2	94.2	7.07
2.95		0.212	437	48.5	92.7	6.83
2.9	2.9	0.220	415	46.9	91.1	6.61
2.8	2.8	0.235	374	43.7	88.0	6.16
2.65		0.263	317	39.2	83.3	5.52
2.6	2.6	0.273	299	37.7	81.7	5.31
2.5	2.5	0.295	266	34.9	78.5	4.91
2.4		0.321	235	32.1	75.4	4.52
2.34		0.337	218	30.5	73.5	4.30
2.3	2.3	0.349	207	29.5	72.3	4.15
2.25		0.365	194	28.2	70.7	3.98
2.2	2.2	0.381	181	27.0	69.1	3.80
2.05		0.439	147	23.4	64.4	3.30
2.03		0.448	142	23.0	63.8	3.24
2.0	2.0	0.462	136	22.3	62.8	3.14
1.83		0.551	104	18.7	57.5	2.63
1.8	1.8	0.570	99	18.1	56.5	2.54
1.7	1.7	0.639	83.6	16.1	53.4	2.27
1.6		0.695	73.7	14.8	51.2	2.09
1.6		0.721	69.7	14.3	50.3	2.01
1.5	1.5	0.821	57.4	12.5	47.1	1.77
1.4		0.942	46.7	10.9	44.0	1.54
1.3		1.09	37.4	9.42	40.8	1.33
1.2	1.2	1.28	29.4	8.03	37.7	1.13
1.1		1.53	22.6	6.75	34.6	0.950
1.0	1.0	1.85	17.0	5.58	31.4	0.785