

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNologiÍ  
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**AUTOMATIZOVANÝ VÝPOČET NÁVRHU  
KELÍMKOVÉ PECE**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**RADOSLAV MÍČEK**

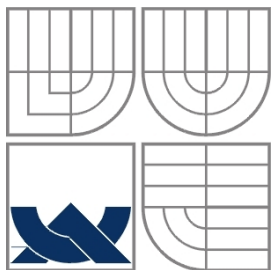
**BRNO 2008**

Bibliografická citace práce:

MÍČEK, R. *Automatizovaný výpočet návrhu kelímkové pece*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 72 stran. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ilona Lázníčková, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem svou **bakalářskou práci** vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

.....



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií**  
**Ústav elektroenergetiky**

**Bakalářská práce**

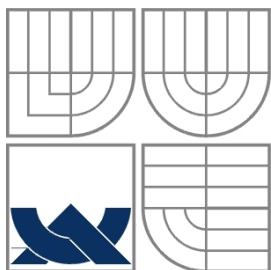
# **Automatizovaný výpočet návrhu kelímkové pece**

**Radoslav Míček**

**vedoucí: Ing. Ilona Lázníčková, Ph.D.**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2008**

**Brno**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**



**Faculty of Electrical Engineering and Communication**

**Department of Electrical Power Engineering**

**Bachelor's Thesis**

# **Automated calculation of resistance crucible furnace design**

**by**

**Radoslav Míček**

**Supervisor: Ing. Ilona Lázníčková, Ph.D.**

**Brno University of Technology, 2008**

**Brno**

## ABSTRAKT

V hlavní části bakalářské práce je nejdříve zpracována problematika elektrického odporového ohřevu z obecného hlediska, tzn. je vysvětlen princip obou základních druhů odporového ohřevu, a dále jsou uvedeny aplikace odporového ohřevu na různých typech elektrických pecí, příp. jiných elektrotepelných zařízení.

Vzhledem k tomu, že práce je v podstatě zaměřena na nepřímý odporový ohřev, je další část věnována topným článkům, které jsou jednou ze základních částí elektrotepelných zařízení využívajících právě nepřímý odporový ohřev. Jsou zde vyjmenovány nejčastěji používané materiály k výrobě topných článků včetně jejich vlastností. Několik odstavců se zabývá i jejich konstrukcí.

V další kapitole hlavní části jsou uvedeny základy navrhování elektrických odporových pecí. Jedná se zejména o výpočty tepelné (celkový příkon pece, doba ohřevu vsázky, příp. jiné základní parametry pece) a výpočty elektrické, jejichž cílem je stanovit parametry topných článků.

Poslední část bakalářské práce se zabývá vlastním návrhem kelímkové pece na tavení hliníku. Kromě jiných parametrů pece (celkový příkon, akumulované teplo, doba náběhu pece atd.) se jedná zejména o volbu materiálu topných elementů a o výpočet parametrů topných spirál, tzn. průměr a délku drátu, vnější průměr spirál a stoupání závitů spirál. Nejdříve jsou uvedeny obecné vztahy, poté následuje příklad výpočtu kelímkové pece s konkrétními parametry a požadavky.

Součástí bakalářské práce je program pro automatizovaný výpočet návrhu kelímkové pece, vytvořený v aplikaci Microsoft Office Excel.

## **ABSTRACT**

In the main part of the bachelor's thesis is primarily elaborated the question of electrical resistance heating in common terms, that means, that the fundamentals of both basic types of resistance heating are explained, and then the applications of resistance heating on different kinds of electric furnaces, eventually other electroheat equipments are mentioned.

Seeing that the bachelor's thesis is in the main oriented on indirect resistance heating, is the next part of this work devoted to heating elements, which are one of the basic parts of electroheat equipments, that utilize indirect resistance heating. There are specified materials most frequently used in heating elements production, including their properties. Some sections deal also with their construction.

In the next chapter, there are mentioned the basics of electric resistance furnace proposing. Especially there are heat calculations (furnace total input, charge soaking time or other basic parameters of the furnace) and electric calculations, whose goal is to determinate parameters of heating elements.

The last part of the bachelor's thesis considers a true project of aluminum melting crucible furnace. Except the other furnace parameters (general input, accumulated heat, furnace rise time etc.) discusses it especially the choice of heating elements materials and the calculation of heating spiral parameters, that means wire length and diameter, external diameter of spirals and lead of screw thread. At first are mentioned common relations and next comes an example of crucible furnace calculation with concrete parameters and requirements.

The bachelor's thesis includes a programme for computerised calculation of crucible furnace project created in Microsoft Office Excel application.

## OBSAH

|                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Seznam obrázků.....</b>                                              | <b>6</b>  |
| <b>Seznam tabulek.....</b>                                              | <b>7</b>  |
| <b>1 Úvod .....</b>                                                     | <b>8</b>  |
| <b>2 Elektrické teplo odporové .....</b>                                | <b>9</b>  |
| <b>2.1 Přímý odporový ohřev.....</b>                                    | <b>9</b>  |
| 2.1.1 Ohřev dlouhých kovových tyčí, drátů, pásů apod.....               | 9         |
| 2.1.2 Pece na výrobu grafitu a karbidu křemíku .....                    | 12        |
| 2.1.3 Přímý odporový ohřev skla .....                                   | 14        |
| 2.1.4 Termická elektrolýza.....                                         | 15        |
| 2.1.5 Solné lázně .....                                                 | 16        |
| 2.1.6 Katodový ohřev .....                                              | 18        |
| 2.1.7 Elektroodový ohřev vody.....                                      | 18        |
| 2.1.8 Elektrostruskové přetavování oceli.....                           | 21        |
| <b>2.2 Nepřímý odporový ohřev.....</b>                                  | <b>22</b> |
| <b>3 Topné články odporových pecí .....</b>                             | <b>24</b> |
| <b>3.1 Kovové materiály .....</b>                                       | <b>25</b> |
| 3.1.1 Austenitické slitiny .....                                        | 25        |
| 3.1.2 Feritické slitiny .....                                           | 26        |
| 3.1.3 Čisté kovy .....                                                  | 26        |
| 3.1.4 Ocel a speciální odporové slitiny.....                            | 27        |
| <b>3.2 Nekovové materiály .....</b>                                     | <b>27</b> |
| 3.2.1 Karbid křemíku (SiC) .....                                        | 27        |
| 3.2.2 Cermetové články .....                                            | 29        |
| 3.2.3 Uhlíkové a grafitové topné články.....                            | 29        |
| <b>3.3 Konstrukce topných článků .....</b>                              | <b>30</b> |
| 3.3.1 Otevřené topné články .....                                       | 30        |
| 3.3.2 Uzavřené topné články.....                                        | 33        |
| <b>4 Základy návrhu a výpočtu odporových pecí .....</b>                 | <b>34</b> |
| <b>4.1 Ztrátový výkon .....</b>                                         | <b>35</b> |
| <b>4.2 Užitečný výkon .....</b>                                         | <b>35</b> |
| <b>4.3 Výpočet doby ohřevu vsázky.....</b>                              | <b>36</b> |
| 4.3.1 Výpočet doby ohřevu v el. odporové peci se stabilní vsázkou ..... | 38        |
| 4.3.2 Přibližný rychlý způsob výpočtu doby ohřevu tenké vsázky.....     | 39        |
| <b>4.4 Výpočet topných článků .....</b>                                 | <b>41</b> |
| 4.4.1 Článek kruhového průřezu – topný drát.....                        | 42        |
| 4.4.2 Článek obdélníkového průřezu – topný pás.....                     | 42        |
| <b>4.5 Povrchové zatížení topných vodičů .....</b>                      | <b>43</b> |
| 4.5.1 Povrchové zatížení při sálání .....                               | 43        |
| 4.5.2 Povrchové zatížení při proudění .....                             | 44        |

|            |                                                                            |           |
|------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.5.3      | Výsledné povrchové zatížení .....                                          | 44        |
| <b>4.6</b> | <b>Rozdělení příkonu pece na topné články .....</b>                        | <b>45</b> |
| <b>5</b>   | <b>Návrh kelímkové pece .....</b>                                          | <b>47</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Přehled vztahů pro výpočet kelímkové pece .....</b>                     | <b>47</b> |
| 5.1.1      | Výpočet užitečného tepla a příkonu pece .....                              | 47        |
| 5.1.2      | Určení přestupové plochy .....                                             | 48        |
| 5.1.3      | Výpočet teplotního spádu ve stěně kelímku a teploty jeho vnější stěny..... | 48        |
| 5.1.4      | Provozní teplota odporových spirál a průměr drátu spirál .....             | 49        |
| 5.1.5      | Jednotkové tepelné ztráty.....                                             | 50        |
| 5.1.6      | Celkové tepelné ztráty a výkon pece.....                                   | 50        |
| 5.1.7      | Výpočet délky vodičů a návrh spirál .....                                  | 51        |
| 5.1.8      | Teploty na rozhraních a střední teploty.....                               | 52        |
| 5.1.9      | Akumulované teplo kelímkové pece.....                                      | 53        |
| 5.1.10     | Doba tavení .....                                                          | 53        |
| <b>5.2</b> | <b>Výpočet návrhu kelímkové pece .....</b>                                 | <b>54</b> |
| <b>6</b>   | <b>Závěr .....</b>                                                         | <b>71</b> |
|            | <b>Použitá literatura.....</b>                                             | <b>72</b> |

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|         |                                                                                |    |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 1  | Přímý odporový ohřev tyčí.....                                                 | 10 |
| Obr. 2  | Průběhy příkonu, ztrát a teploty při přímém odporovém ohřevu ocelové tyče..... | 10 |
| Obr. 3  | Časové průběhy teplot při ohřevu ocelové tyče.....                             | 11 |
| Obr. 4  | Schéma zařízení pro průběžný ohřev drátu (pásu).....                           | 12 |
| Obr. 5  | Grafitační pec Achesonova.....                                                 | 13 |
| Obr. 6  | Pec na výrobu karbidu křemíku.....                                             | 13 |
| Obr. 7  | Elektrodová sklářská vana.....                                                 | 14 |
| Obr. 8  | Elektrolyzér na výrobu hliníku.....                                            | 15 |
| Obr. 9  | Solná lázeň I. typu.....                                                       | 16 |
| Obr. 10 | Solná lázeň II. typu.....                                                      | 17 |
| Obr. 11 | Solná lázeň II. typu.....                                                      | 17 |
| Obr. 12 | Katodový ohřev.....                                                            | 19 |
| Obr. 13 | Jednofázový elektrodový kotel.....                                             | 19 |
| Obr. 14 | Průtokový trojfázový ohřívač vody.....                                         | 20 |
| Obr. 15 | Průtokový trojfázový ohřívač 10 MW, 6 kV.....                                  | 21 |
| Obr. 16 | Elektrostruskové přetavování oceli.....                                        | 21 |
| Obr. 17 | Topné články SiC.....                                                          | 28 |
| Obr. 18 | Trojfázový topný článek SiC.....                                               | 28 |
| Obr. 19 | Cermetový článek na příkon 3,33 kW.....                                        | 29 |
| Obr. 20 | Provedení a uložení topných drátových článků.....                              | 31 |
| Obr. 21 | Provedení a uložení topných pásových článků.....                               | 32 |
| Obr. 22 | Uzavřené topné články.....                                                     | 33 |
| Obr. 23 | Teplotní křivky pece a vsázky.....                                             | 38 |
| Obr. 24 | Ohřev vsázky, $t = kJ'^2$ .....                                                | 40 |
| Obr. 25 | Sálání dvou obklopujících se ploch – rovnice (34).....                         | 43 |
| Obr. 26 | Povrchové zatížení topných článků.....                                         | 45 |
| Obr. 27 | Zapojení skupin topných článků.....                                            | 45 |
| Obr. 28 | Průřez kelímkové pece.....                                                     | 54 |
| Obr. 29 | Průřez keramického nosníku.....                                                | 55 |
| Obr. 30 | Vinutí spirály topného drátu a vnější přestupná plocha pro výpočet ztrát.....  | 56 |

## SEZNAM TABULEK

|                                                                                       |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Tab. 1 Některé používané směsi solí a jejich pracovní teploty.....</i>             | <i>18</i> |
| <i>Tab. 2 Rezistivity a pracovní teploty nemagnetických odporových materiálů.....</i> | <i>25</i> |
| <i>Tab. 3 Materiálové konstanty jednotlivých částí kelímkové pece.....</i>            | <i>65</i> |
| <i>Tab. 4 Topné dráty KANTHAL A-1, APM.....</i>                                       | <i>68</i> |
| <i>Tab. 5 Dovolené zatížení drátů KANTHAL – část 1.....</i>                           | <i>69</i> |
| <i>Tab. 6 Dovolené zatížení drátů KANTHAL – část 2.....</i>                           | <i>70</i> |

# 1 Úvod

Tepelné účinky elektrického proudu byly známy již ve 2. polovině 18. století. Brzy po objevení galvanických článků, tj. prvních zdrojů schopných dodávat po delší dobu elektrický proud, se zjistilo, že vodič, kterým proud prochází, se zahřívá (Jouleovy ztráty – teplo odporové). Průmyslové využití elektrického odporového tepla však mohlo nastat až koncem 19. století, kdy již byly k dispozici mohutné zdroje elektrické energie – rotační generátory. Od počátku 20. století se začalo elektrického tepla využívat ve stále větším měřítku. V naší republice je v současné době v průmyslových závodech několik desítek tisíc elektrických pecí, převážně odporových. Odporové pece laboratorní mívají příkon několik málo kW, velké odporové pece pro tepelné zpracování (žhánění) odlitků až o váze 150 t mají příkon 2000 kW až 3000 kW. Hutnické pece oblouk-odporové, ve kterých se vyrábí např. ferroslitiny, karbid vápníku, karbid křemíku atd., se stavějí až do příkonu 40000 kW·A.

Jak již bylo řečeno, v elektrotepelných zařízeních odporových se mění energie elektrická v tepelnou podle Jouleova zákona: prochází-li elektrický proud vodičem, vzniká ve vodiči teplo. Vznik odporového tepla můžeme vysvětlit takto: po připojení topného článku nebo vsázky ke zdroji napětí vznikne ve vodiči článku nebo v elektricky vodivé vsázce elektrické pole, jehož intenzita má směr vodiče. Ve směru této intenzity jsou usměrňovány volné elektrony, které tím vytvářejí proud. Volný elektron ve vodiči letí pohybem rovnoměrně zrychleným mezi atomy kovu a po krátké době narazí na atom, který mu stojí v cestě. Při nárazu předá elektron atomu svou kinetickou energii. Tím se zvětší rozkmit atomu, což se projeví stoupáním teploty vodiče. Tentýž výklad vzniku tepla platí pro proud stejnosměrný i střídavý. Teplo se předává do okolí za současného růstu teploty samotného vodiče. Množství tepla je úměrné druhé mocnině proudu a elektrickému odporu vodiče.

Následující text má za úkol nastínit nepřeberné možnosti průmyslového využití elektrického odporového tepla a seznámit se základy a obecnými výpočty týkajícími se navrhování elektrických odporových pecí. Součástí bakalářské práce je rovněž příklad výpočtu návrhu odporové kelímkové pece na tavení hliníku, resp. návrh topných článků do zmíněného typu pece. Při výpočtu parametrů topných elementů vycházíme z předpokladu, že známe mj. rozměry pece a materiály použité při její konstrukci, druh a hmotnost vsázky, počáteční teplotu vsázky a požadovanou teplotu ohřátí vsázky.

K bakalářské práci je přiložen program pro automatizovaný výpočet návrhu kelímkové pece, který byl vytvořen v aplikaci Microsoft Office Excel. Tento program umožňuje výpočet parametrů topných článků pece s tím, že lze vstupní parametry pro výpočet libovolně měnit na základě skutečných požadavků a parametrů pece.

## 2 Elektrické teplo odporové

### 2.1 Přímý odporový ohřev

V zařízeních pro přímý odporový ohřev vzniká teplo přímým průchodem proudu buď elektricky vodivou pevnou vsázkou nebo elektricky vodivou kapalinou – elektrolytem obklopujícím vsázku. Množství tepla je úměrné druhé mocnině proudu, elektrickému odporu vodiče a době průchodu proudu podle vztahu

$$Q = RI^2t = Pt. \quad [J] \quad (1)$$

Výpočty a projektování takovýchto zařízení nejsou snadné, neboť fyzikální vlastnosti vsázky či elektrolytu – zejména rezistivita, měrná tepelná kapacita a také součinitel tepelné vodivosti – jsou nelineárně závislé na teplotě. Tyto veličiny bezprostředně ovlivňují tepelnou bilanci ohřevu, kterou lze vyjádřit vztahem

$$Q = Q_u + Q_z, \quad [J] \quad (2)$$

kde  $Q$  je teplo vzniklé průchodem proudu,  
 $Q_u$  užitečné teplo potřebné k ohřevu vsázky,  
 $Q_z$  teplo spotřebované na krytí ztrát, odvedené povrchem vsázky.

Tato tepelná bilance tvoří základ k určení potřebného výkonu, který závisí na časovém průběhu ohřevu vsázky

$$P \sim \frac{dQ}{dt}.$$

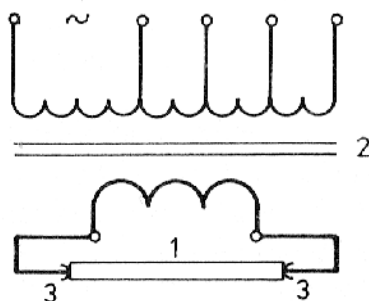
Zařízení pro přímý odporový ohřev lze podle vzniku tepla rozdělit na dva základní typy:

- *zařízení pro ohřev pevné vsázky* kovové, uhlíkové nebo grafitové (kovová vsázka je ve tvaru tyčí, drátů, pásů apod.);
- *zařízení pro ohřev tekuté vsázky*; tekutou vsázkou může být voda (elektrodové kotle) nebo roztavené sklo (elektrický příhřev a tavení skla), v tekuté vsázce může probíhat elektrolýza (výroba hliníku termickou elektrolýzou) nebo se v ní může ohřívat pevná kovová vsázka (solné lázně pro rychlé zahřátí drobné vsázky, např. kuliček nebo kroužků do kuličkových ložisek, nebo tzv. katodový ohřev kovové vsázky ve vodním roztoku soli).

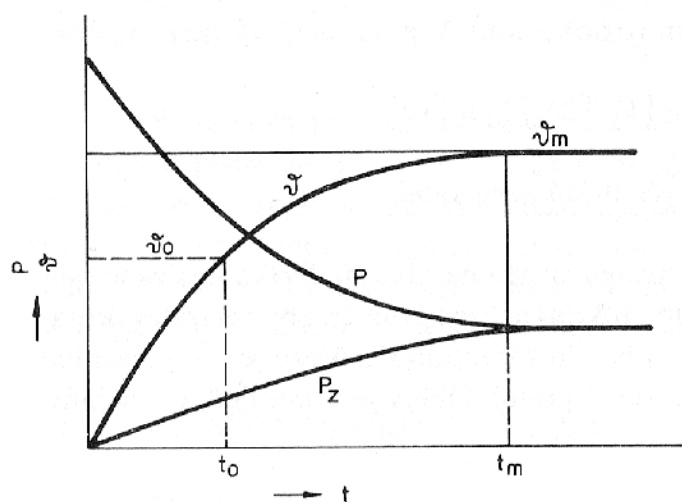
#### 2.1.1 Ohřev dlouhých kovových tyčí, drátů, pásů apod.

Princip ohřevu je schematicky znázorněn na obr. 1. Aby byl ohřev po celé délce dostatečně rovnoměrný, musí být délka ohříváné tyče nejméně 10krát větší než její průměr. Do tyče konstantního průřezu je z regulačního transformátoru (napájení střídavým proudem) nebo z křemíkového usměrňovače (napájení stejnosměrným proudem) veden přes měděné a vodou chlazené kontakty velký proud. Napětí na kontaktech je nízké, do 30 V. Zařízení

mohou mít několik dvojic kontaktů, elektricky řazených za sebou nebo vedle sebe pro současné zpracování více kusů. Ohřev je velmi rychlý a účinný. Optimální poměry pro ohřev nastávají, jestliže se činný odpor tyče rovná impedanci celého přívodního vedení. Tuto podmínku lze v praxi dodržet jen přibližně, protože odpor např. oceli při ohřevu ze 20 °C na 1200 °C stoupá až sedmkrát. Pro impedanční přizpůsobení zvyšujeme během ohřevu napětí na tyči souhlasně s růstem odporu (zejména u velkých výkonů), a to přepínáním odboček na primáru transformátoru. Účinník u přímého odporového ohřevu je poměrně nízký, neboť u vysokých proudů se výrazně uplatňuje reaktance přívodů ke kontaktům. Jisté potíže vznikají s přivedením proudu do tyče. Konce tyčí musí být čisté, kontakty jsou k ohřívané tyči přitlačovány pneumaticky nebo hydraulicky. Ohříváný materiál je po dobu ohřevu vázán na kontakty, což ztěžuje mechanizaci. Další nevýhoda je v tom, že se při každé ohřívané tyči musí ohřev zapínat a vypínat, čímž rostou nároky na spínací zařízení i na velikost zkratového výkonu v síti, aby při zapínání ohřevu nedocházelo ke kolísání napětí v síti.



Obr. 1 Přímý odporový ohřev tyčí – 1 ohříváná tyč, 2 regulační transformátor, 3 kontakty [1]



Obr. 2 Průběhy příkonu, ztrát a teploty při přímém odporovém ohřevu ocelové tyče [1]

Ke zkrácení doby ohřevu a tím k dosažení vysoké tepelné účinnosti ohřevu jsou zařízení na přímý ohřev navrhována ve stovkách kW. Způsobují však nerovnoměrné zatížení sítě. U zařízení nad 500 kW je nutno použít symetrizačního zařízení k převedení jednofázové zátěže

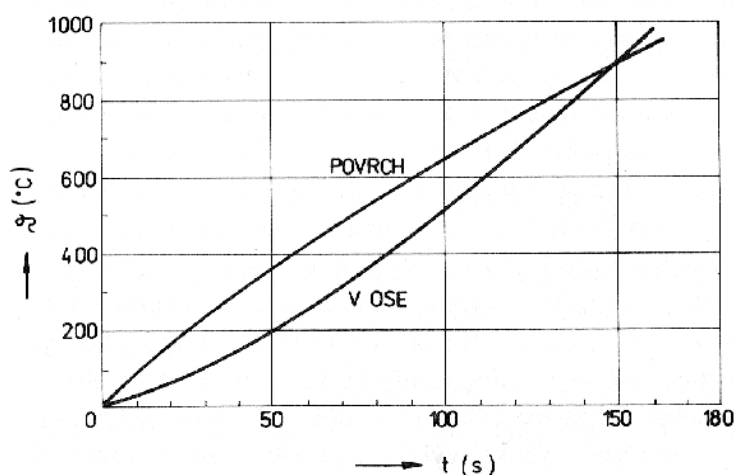
na symetrickou trojfázovou zátěž. Ohřev přímým průchodem proudu se výhodně aplikuje při výkonech do 100 kW, u velkých výkonů je výhodnější ohřev indukční.

Průběhy příkonu, teploty a ztrát při přímém odporovém ohřevu ocelové tyče bez přepínání napětí jsou na obr. 2. S rostoucím odporem tyče klesá příkon a rostou tepelné ztráty. Rovná-li se příkon ztrátám, dosáhla teplota své mezní hodnoty. Proto musí být teplota ohřevu nižší než teplota mezní a je jí dosaženo za čas značně kratší, než je čas potřebný k dosažení teploty mezní.

Při přímém ohřevu ocelových feromagnetických tyčí střídavým proudem se značně uplatňuje povrchový jev (tzv. skinefekt). Největší teplo (86,4 %) vzniká v hloubce vniku  $a$ , kterou lze určit podle vztahu

$$a = \sqrt{\frac{2r}{\omega \mu_0 \mu_r}}, \quad [\text{m}] \quad (3)$$

kde  $\rho$  je rezistivita tyče,  
 $\omega = 2\pi f$ ,  
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$  (permeabilita vakua),  
 $\mu_r$  relativní permeabilita.

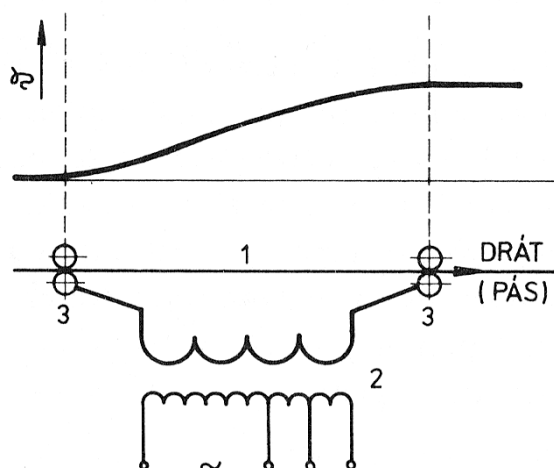


Obr. 3 Časové průběhy teplot při ohřevu ocelové tyče [1]

Do ztráty feromagnetismu (Curieův bod – u uhlíkaté oceli při 768 °C) je při 50 Hz hloubka vniku řádově v jednotkách mm; při vyšší teplotě ( $\rho$  je asi sedmkrát větší) asi 70 mm. Proto se nejdříve ohřívá povrch tyče a nad 760 °C naopak více vnitřek tyče, protože povrch vyzařuje tepelné ztráty sáláním. Časové průběhy teploty povrchu tyče a teploty v její ose (průměr tyče 0,07 m) jsou znázorněny na obr. 3.

Zařízení pro průběžný ohřev drátu nebo pásu je znázorněno schematicky na obr. 4. Drát nebo pás je do proudového obvodu výstupní strany transformátoru připojen kladkami nebo grafitovými bloky, přičemž konečné teploty ohřevu lze docílit změnou napětí mezi kladkami,

změnou jejich vzájemné vzdálenosti nebo změnou protahovací rychlosti drátu. Mezi výhody přímého ohřevu patří nízká spotřeba elektrické energie, vysoká rychlost ohřevu a s tím související nízká oxidace i oduhličení. Popsaný způsob ohřevu se používá např. pro měkké žíhání měděných drátů a pásů před izolací pláštěm, pro ohřev ocelových tyčí pro kování, pro ohýbání, kalení drátů do předpjatého betonu apod.



Obr. 4 Schéma zařízení pro průběžný ohřev drátu (pásu) – 1 ohříváný drát, pás, 2 regulační transformátor, 3 kladky a přívody [1]

### 2.1.2 Pece na výrobu grafitu a karbidu křemíku

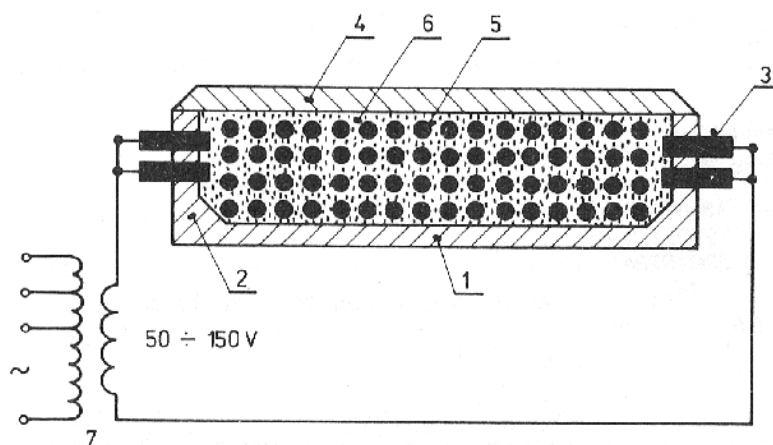
Grafit a karbid křemíku (karborundum) se vyrábějí v *Achesonových pecích*.

Grafit se vyrábí z uhlíku tzv. grafitací – chemickým procesem probíhajícím při teplotě asi 2500 °C, při němž probíhá strukturální přeměna amorfního uhlíku na grafit. Výrobky určené ke grafitaci (kartáče, elektrody, trubky aj.) se lisují ze směsi antracitu, petrolejového koksu, mletého grafitového odpadu, smoly a kamenouhelného dehtu. Při vysoké teplotě dochází k difúzi uhlíkových molekul v jednotlivých částech směsi a výsledkem je homogenní materiál – grafit.

*Grafitací pec* je schematicky znázorněna na obr. 5. Proud z regulačního transformátoru je do vsázky přiváděn prostřednictvím grafitových bloků, které jsou zapuštěny do čelních stěn pece jako elektrody. Vsázka určená ke grafitaci je zasypaná ve směsi z drceného grafitu, zrnitého koksu a černého uhlí. Hmotnost vsázky bývá 50 t i více, pece mají délku až 20 m, s transformátory s příkonem až 10 MV·A. Napájecí napětí je regulováno v rozsahu 50 V až 200 V, počet odboček až 30.

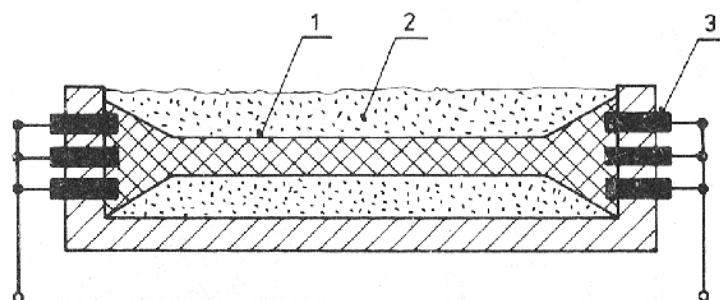
Tyto pece jsou převážně jednofázová zařízení; mají také malý účinník (kolem 0,5) a zatěžují napájecí síť nerovnoměrně. Proto se používá symetrizační zařízení, zejména u pecí s velkými výkony. Je-li použito napájení stejnosměrným proudem, kompenzace i symetrizace

odpadá a regulace výkonu je jednodušší. Spotřeba elektrické energie na výrobu 1 kg grafitu se pohybuje od 4 kW·h do 6 kW·h, ohřev trvá 2 až 4 dny.



Obr. 5 Grafitační pec Achesonova – 1 dno pece, 2 čelní stěny, 3 grafitové bloky, 4 víko pece, 5 vsázka, 6 zásypová směs, 7 regulační transformátor [1]

Pro výrobu karbidu křemíku (SiC) se používají pece obdobné konstrukce (viz obr. 6). Pec však nemá víko, aby mohl unikát oxid uhelnatý vznikající při reakci a hořící na povrchu vsázky. Grafitové jádro je zasypáno směsí z koksu, křemičitého písku, dřevěných pilin (kvůli poréznosti) a NaCl. Průchodem proudu dochází k silnému ohřevu jádra a v důsledku chemické reakce, která probíhá při teplotě asi 1800 °C, vzniká SiC.

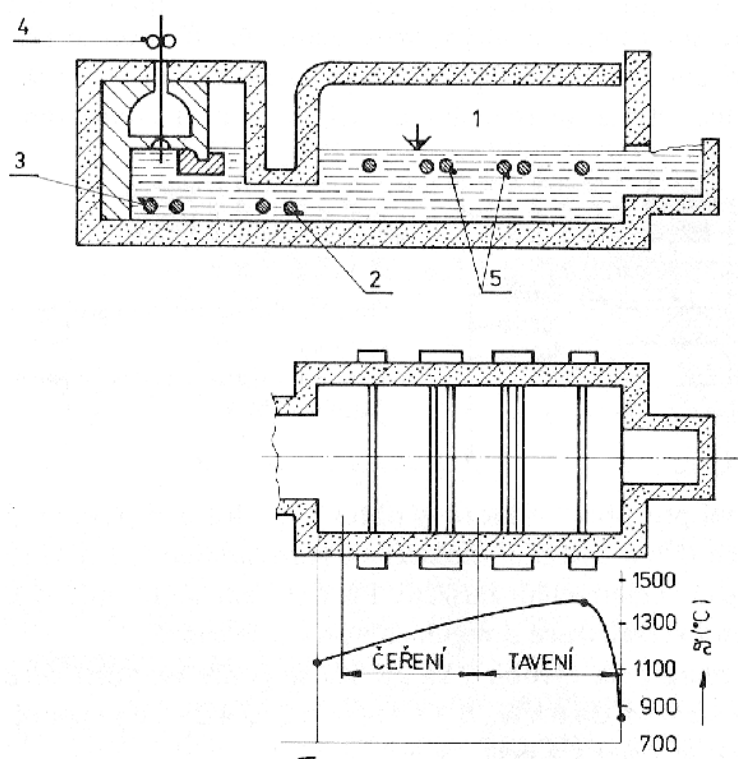


Obr. 6 Pec na výrobu karbidu křemíku – 1 grafitové jádro, 2 zásypová směs, 3 grafitové bloky [1]

Pece mají délku do 12 m, průřez grafitového jádra je do 0,3 m<sup>2</sup>, příkon regulačního transformátoru do 1500 kV·A. Pracovní napětí je 300 V na počátku a 150 V na konci procesu. Spotřeba elektrické energie na výrobu 1 kg SiC je 8 kW·h. Karbid křemíku se používá na výrobu brusného materiálu, topných (tzv. silitových) tyčí, nosných podložek do odporových pecí apod.

### 2.1.3 Přímý odporový ohřev skla

Princip elektrického tavení skla spočívá ve využití vodivých vlastností skloviny v nataveném stavu. Aby se vyloučila možná elektrolýza, používá se napájení střídavým proudem, který se do vany pece s roztavenou sklovinou přivádí systémem kovových (molybden, čisté železo s obsahem uhlíku pod 0,03 %, oxid cíničitý, superkhantal), grafitových, případně jiných žáruvzdorných elektrod. Tvar a rozmístění elektrod se volí tak, aby kromě rovnoměrného přenosu energie do skloviny byl zabezpečen přiměřený elektrodynamický účinek, vyvolávající proudění a tím teplotní i materiálovou homogenizaci skloviny. Mezi výhody přímého ohřevu proti ohřevu plynem patří již zmíněná homogenizace, dále čistota taveniny; nedochází ke ztrátám přísad úletem do komína, dosahuje se přesné teploty a viskozity atd.



Obr. 7 Elektrodová sklářská vana – 1 prostor pro tavení skla, 2, 3 elektrody v pracovním prostoru, 4 tažné zařízení, 5 elektrody v tavicím prostoru [1]

Jako příklad *elektrodové sklářské pece* je na obr. 7 tavicí a pracovní vana na výrobu tabulového skla. Sklovina roztavená elektrodami v tavicím prostoru je přiváděna do pracovního prostoru, v němž jsou elektrody způsobující ohřev skla na požadovanou teplotu a viskozitu; sklo se pak může táhnout ve tvaru pásu směrem vzhůru tažným zařízením. Podobným způsobem se vyrábějí např. trubice pro zářivky, sklo Simax aj.

Elektrody jsou ve vhodném uspořádání a propojení připojeny na zdroj třífázového proudu 50 Hz tak, aby zatěžovaly síť rovnoměrně. Z důvodu záporné charakteristiky skloviny musí

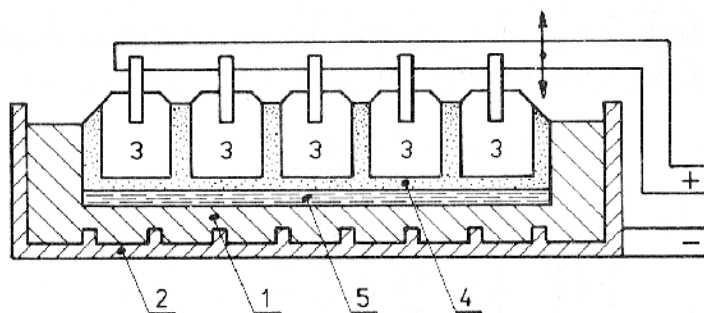
být napětí na peci regulovatelné, podle velikosti pece bývá 50 V až 300 V. Příkon byl dříve regulován autotransformátory nebo natáčivými transformátory, dnes je regulován fázovými nebo pulsními tyristorovými regulátory.

U sklářských pecí se často kombinuje plynový ohřev s elektrodovým, přičemž základní teplo se dodává plynem a teplo technologicky náročné na regulaci a čistotu pak elektřinou.

#### 2.1.4 Termická elektrolýza

Termické elektrolyzéry jsou zařízení, ve kterých se při vysoké teplotě, způsobené přímým průchodem stejnosměrného proudu elektrolytem, uskutečňuje elektrolýza (tj. chemický rozklad elektrolytu vlivem elektrického proudu) nebo rafinace. Nejrozšířenější termickou elektrolýzou je elektrolytická výroba hliníku; používá se také k výrobě sodíku a hořčíku.

Hliník se vyrábí z  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (základní složka bauxitu), který má tavicí teplotu asi 2050 °C. Rozpuštěním bauxitu v roztaveném kryolitu (fluorid hlinito-sodný) lze však již při 950 °C elektrolýzou získávat hliník, což je technicky mnohem schůdnější.



Obr. 8 Elektrolyzér na výrobu hliníku – 1 tuhový katodový blok vany, 2 ocelový plášť se žebry, 3 elektrody, 4 elektrolyt, 5 tavený surový hliník [1]

*Elektrolyzér* na výrobu hliníku je schematicky znázorněn na obr. 8. Je tvořen tepelně izolovanou vanou s vnitřním rozměrem 4 × 3 m a hloubkou 0,5 m. Katodu tvoří dno vany vyložené tuhovými bloky. Vana je v ocelovém plášti se žebry pro přívod proudu. Anodové elektrody jsou uhlíkové ploché bloky spojené s kladnou sběrníci, s níž se dají spouštět či zdvihat v elektrolytu. Při elektrolýze se hliník vylučuje v tekutém stavu a protože je těžší než ostatní složky elektrolytu, usazuje se na dně vany, kde tvoří vrstvu. V určitých pravidelných intervalech se tekutý hliník vypouští a přidává se nový bauxit. Uvolňující se kyslík reaguje s anodou za vzniku oxidu uhelnatého (CO) a oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>).

Rozkladné (disociační) napětí  $\text{Al}_2\text{O}_3$  je přibližně 2,2 V, depolarizační napětí anody je asi 1,1 V, úbytky napětí na přívodech jsou asi 1,7 V. Potřebné napětí na jeden elektrolyzér je asi 5 V. Elektrolyzéry se proto zapojují do série (např. při 300 V celkem 60 elektrolyzérů). Stejnosměrný proud 10 kA až 100 kA (podle rozměrů vany) se získává z polovodičových usměrňovačů.

Na výrobu 1 kg hliníku se spotřebuje 16 kW·h až 22 kW·h (podle velikosti a technického stavu zařízení), z toho 30 % až 40 % na disociaci  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

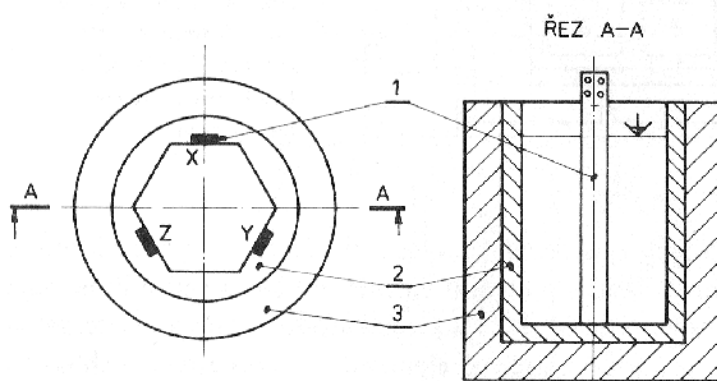
### 2.1.5 Solné lázně

V tomto případě prochází proud elektrolytem – roztavenou solí, která je nositelem tepla. Ohřev elektrolytu je obdobný jako ohřev roztaveného skla. *Solné lázně* se používají k rychlému zahřátí ocelových součástí, např. kuliček nebo kroužků do kuličkových ložisek. Vsázka (obvykle drobné součásti) se umístí do speciálního koše ze žáruvzdorného pletiva. S tímto košem se materiál ponoří do roztavené lázně, kde se po krátké době zahřeje na její teplotu. Po vyjmutí nastává např. kalení nebo popouštění. Tato zařízení se používají také pro tepelné zpracování barevných kovů nebo slitin při teplotách až 1400 °C.

Rozlišují se dva základní typy solných lázní:

- I. typ: vsázka se nachází v elektrickém poli taveniny, takže zčásti jí prochází proud; při nevhodném tvaru vsázky (ostré okraje, tenké mezistěny apod.) dojde k jejímu přehřátí, popř. k odtavení vlivem nadměrné hustoty proudu; příkon zařízení závisí na vsázce (na jejím odporu);
- II. typ: vsázka se vkládá do soli v místě, kde není elektrické pole, a vsázkou proud neprochází; příkon na parametrech vsázky nezávisí.

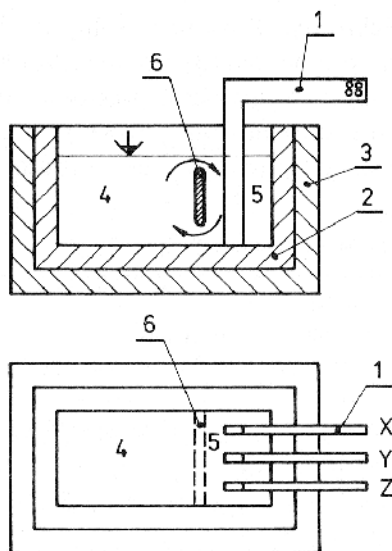
Na obr. 9 je znázorněn princip prvního typu solné lázně. Tři elektrody (X, Y, Z) jsou připojeny k trojfázovému regulačnímu transformátoru. Uvnitř kelímku je roztavená sůl, do níž se vkládá vsázka.



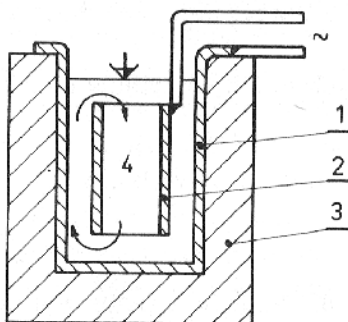
Obr. 9 Solná lázeň I. typu – 1 elektrody, 2 keramický kelímek, 3 tepelná izolace kelímku [1]

Na obr. 10 je znázorněn druhý typ solné lázně. Vana má v řadě tři elektrody (X, Y, Z), přičemž vsázka je od mezielektrodového prostoru oddělena přepážkou. Vlivem elektrodynamického a tepelného proudění elektrolytu (naznačeno šipkami) je v celém prostoru dobrá rovnoměrnost teploty.

Na obr. 11 je naznačen řez jednofázovou solnou lázní také druhého typu s kruhovým kelímkem ze žárovzdorné oceli, který tvoří zároveň jednu elektrodu. Druhou elektrodou je dutý válec z téže oceli, opatřený otvory. Do něj se vkládá vsázka.



Obr.10 Solná lázeň II. typu – 1 elektrody, 2 keramická vana, 3 tepelná izolace vany, 4 prostor pro vsázku, 5 prostor s elektrodami, 6 oddělovací přepážka [1]



Obr. 11 Solná lázeň II. typu – 1 kovový kelímk, 2 dutý kovový válec, 3 tepelná izolace kelímku, 4 prostor pro vsázku [1]

Solné lázně s keramickými kelímkami se používají pro teploty až do 1350 °C. Avšak např. kyanové soli, které se používají pro kalení, zatepla s keramikou silně reagují. Proto se v tomto případě používají kelímky ze žárovzdorných ocelí, avšak jen pro teploty nejvýše do 1000 °C. Elektrody (popř. i kelímky) se vyrábějí z nízkouhlíkaté oceli a mají velké stykové plochy, aby se zabránilo nadměrnému místnímu přehřátí. Použité materiály musí vzdorovat roztaveným solím. Proudové zatížení elektrod bývá obvykle asi  $50 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$  plochy elektrody v lázni.

Vzhledem k tomu, že soli v tuhém stavu jsou elektricky nevodivé, je nutné je při roztápění natavit pomocnými, např. trubkovými ponornými topnými články na teplotu, při které se

stávají vodivými. K ohřevu tuhé soli je možno použít i pomocnou grafitovou elektrodu (k vytáhnutí oblouku, který roztaví tenkou vrstvu soli) nebo odporové články umístěné mezi elektrody. Při ohřevu soli klesá její odpor, takže je nutné regulovat napětí. Solné lázně pracují s napětím od 8 V do 25 V; používají se regulační transformátory (10 až 12 regulačních stupňů podle příkonu pece a skupiny použitých solí) nebo fázová či pulsní tyristorová regulace proudu. Výkony solných lázní jsou od 20 kW do 100 kW.

Hlavní výhodou solných lázní je rychlý, přesný a rovnoměrný ohřev vsázky bez přístupu vzduchu. Směs soli se volí podle požadované pracovní teploty solné lázně. Vhodným chemickým složením soli lze docílit také tepelného zpracování povrchu vsázky chemickou cestou. Pokud je to možné, solné lázně neodstavujeme úplně z provozu. V pracovních přestávkách pouze snižujeme výkon tak, aby se lázeň udržela ještě v tekutém stavu.

Chemické složení některých používaných solí, jejich teplota tavení a rozsah použití jsou uvedené v tab. 1.

*Tab. 1 Některé používané směsi solí a jejich pracovní teploty [1]*

| Složení                                          | Teplota tavení<br>[°C] | Rozsah použití<br>[°C] |
|--------------------------------------------------|------------------------|------------------------|
| 28 % NaCl + 72 % CaCl <sub>2</sub>               | 505                    | 540 až 870             |
| 50 % Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + 50 % KCl  | 560                    | 590 až 815             |
| 50 % NaCl + 50 % K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>  | 560                    | 590 až 815             |
| 35 % NaCl + 65 % Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | 620                    | 650 až 815             |
| 50 % CaCl <sub>2</sub> + 50 % BaCl <sub>2</sub>  | 600                    | 650 až 900             |
| 22 % NaCl + 78 % BaCl <sub>2</sub>               | 630                    | 680 až 900             |
| 44 % NaCl + 56 % KCl                             | 665                    | 750 až 870             |
| 20 % KCl + 80 % BaCl <sub>2</sub>                | 750                    | 850 až 1350            |

### 2.1.6 Katodový ohřev

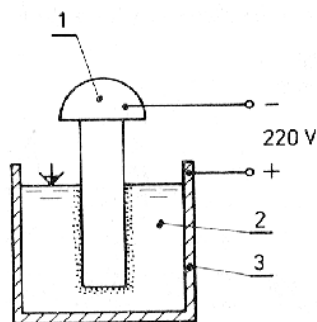
Princip je znázorněn na obr. 12. Součást se ponoří do elektrolytu (např. voda s 10 % Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>); součástka je katodou, kovová nádoba anodou. Na povrchu součásti (vsázky) se během několika milisekund vytvoří vrstvička páry, která odtlačuje elektrolyt od povrchu vsázky, dochází k elektrolýze. Přechodový odpor stoupá a vzniklým elektrickým obloukem se vsázka intenzívně ohřívá.

Tato metoda je vhodná pro ohřev nýtů, šroubů, hřídelů určených ke kalení nebo tváření. Pracuje se s poměrně vysokým napětím.

### 2.1.7 Elektroodový ohřev vody

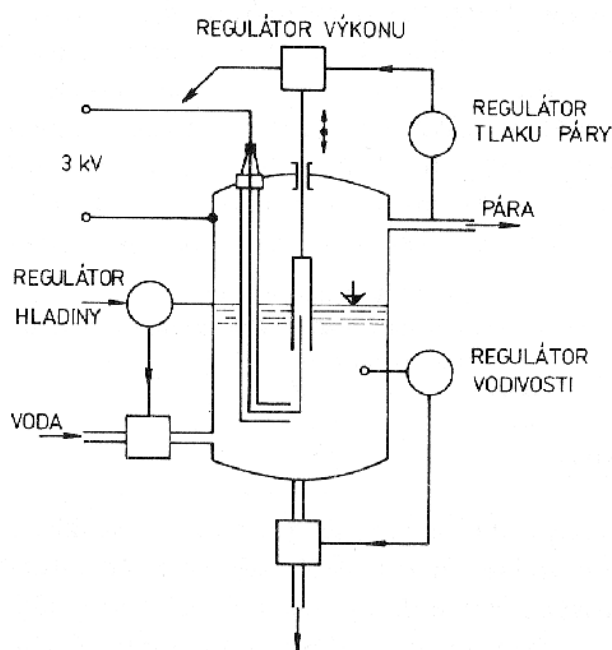
Pro přípravu horké vody a výrobu páry se využívá tepla vznikajícího přímým průchodem proudu ohřívanou vodou. Vodivosti vody se využívá v různých konstrukcích *elektroodových kotlů*; ty pracují se střídavým napětím kvůli zamezení vývinu výbušných plynů a koroze.

Proud se podle velikosti příkonu přivádí elektrodami grafitovými (pro malé příkony) nebo kovovými (pro příkony velké). I když jsou tato zařízení konstrukčně jednoduchá, výpočty jsou značně komplikované s ohledem na závislost elektrické vodivosti vody na jejím chemickém složení a teplotě (např. v rozmezí teplot od 25 °C do 90 °C elektrická vodivost určité vody roste od  $15,2 \cdot 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$  do  $38,9 \cdot 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ ). Hustota proudu povrchem elektrody se volí do  $1,5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ , častěji kolem  $0,5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Výkon se reguluje změnou vodivosti vody, změnou vzdálenosti elektrod, jejich vzájemným přepojováním nebo plochou elektrod.



Obr. 12 Katodový ohřev – 1 ohříváná součást, 2 elektrolyt, 3 kovová nádoba [1]

Elektrické kotle se konstruují nejen pro napětí 220 V a 380 V, ale také pro napětí vysoká až do 30 kV. Elektrody jsou deskové nebo tyčové, pevné i přestavitelné trubkové. U vysokonapěťových kotlů s výkonem nad 2 MW při napětí přes 6 kV se výkon reguluje pomocí porcelánové nebo křemenné trubky, umísťované mezi elektrody pro změnu cesty proudu (mění se tak elektrický odpor, a tím výkon elektrodového kotle).

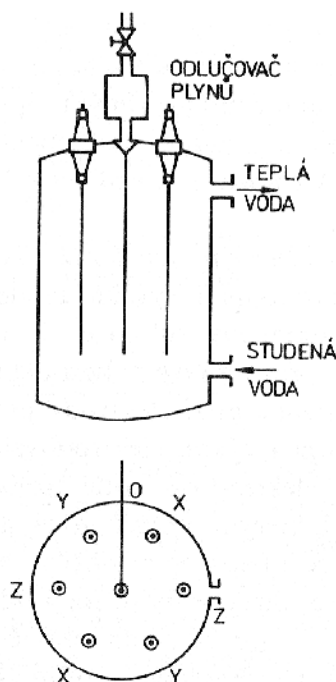


Obr. 13 Jednofázový elektrodový kotel [1]

Pro velké výkony a vysoká napětí se staví elektrodové kotle trojfázové se zvláštní hlavou s tryskami (nulový bod soustavy), kterými proudí voda, uzavírající tak proudový obvod mezi hlavou a elektrodami a intenzívně se ohřívá. Výkon se reguluje změnou počtu trysek. Průtokové kotle se staví od výkonu několika kW až do několika MW. Často se voda ohřívá nočním proudem jako akumulární médium pro vytápění i technologické účely. K průmyslové výrobě horké vody a páry se stavějí kotle s výkonem až 60 MW při provozním napětí 30 kV.

Pro vaření se používají *elektrodové kotle na výrobu páry*, která se po rozvodu do varných kotlů vrací jako kondenzát. Princip takového jednofázového kotle je na obr. 13. Regulátor výkonu v závislosti na tlaku páry ovládá krycí porcelánovou trubku na středové elektrodě a výkonový vypínač v přívodu 3 kV.

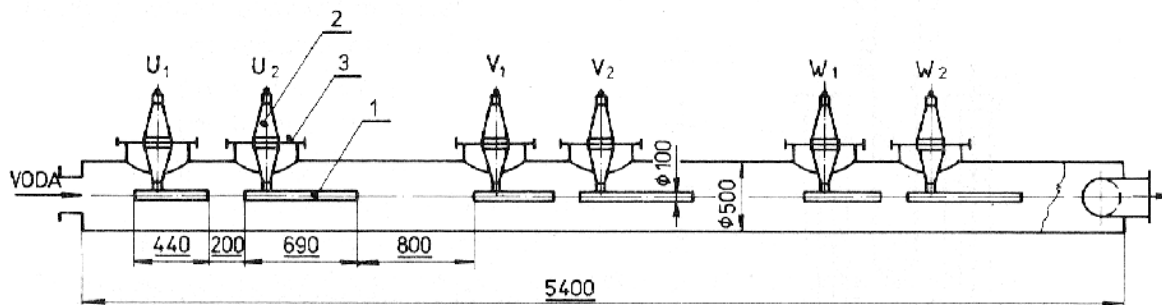
*Průtokový trojfázový ohřívač vody pro napětí 380 V* je schematicky znázorněn na obr. 14. Přestože při střídavém proudu vzniká jen malé množství plynů, jsou u ohřívačů vždy odlučovače, kde se plyny a vzduch shromažďují a po určité době vypouštějí.



Obr. 14 Průtokový trojfázový ohřívač vody [1]

Na obr. 15. je schéma *trojfázového průtokového ohřívače 10 MW, 6 kV*. Ohřívač má dvě soustavy elektrod, které se zapínají podle požadovaného příkonu nebo podle vodivosti vody. Na základní uzemněné trubce ohřívače se vytvoří nulový bod, takže elektrody  $U_1$ ,  $V_1$ ,  $W_1$ , popř.  $U_2$ ,  $V_2$ ,  $W_2$  jsou zapojeny do hvězdy. Ohřívač je připojen přes dva samostatné oddělovací transformátory 5,5 MV·A na síť 22 kV. Je jednoduchý a vzhledem k výkonu má poměrně malé rozměry. Elektrody jsou ocelové trubky průřezu  $10 \times 0,8$  cm, izolátory musí dobře těsnit a snášet dosti rychlé změny teplot a poměrně značné tlaky (asi 1,2 MPa).

Elektrodový ohřev vody se nesmí připojit na napětí bez vody mezi elektrodami, neboť by došlo k přeskokům.

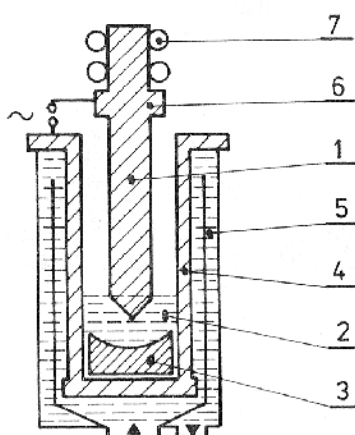


Obr. 15 Průtokový trojfázový ohřívač 10 MW, 6 kV – 1 elektrody, 2 izolátory, 3 zaslepené příruby [1]

V provozu elektrodových kotlů je nutné dodržovat ČSN 34 3100, která předepisuje příslušná ochranná zařízení.

### 2.1.8 Elektrostruskové přetavování oceli

Elektricky vodivá struska se procházejícím proudem udržuje v tekutém stavu při teplotách 1700 °C až 2000 °C. Chemickým působením aktivních strusek a urychlenou krystalizací v krystalizátoru se dosáhne zvýšené kvality přetavovaných ocelí, zejména ocelí žárovzdorných, speciálních konstrukčních, rychlořezných a kuličkových.



Obr. 16 Elektrostruskové přetavování oceli – 1 elektroda, 2 roztavená struska, 3 přetavený ingot, 4 krystalizátor, 5 chladicí voda, 6 objímka elektrody, 7 zařízení k posuvu elektrody [1]

Princip *elektrostruskové pece* je znázorněn na obr. 16. Elektrodu tvoří válcovaná, kovaná nebo lisovaná tyč z elektrooceli. Její dolní konec je ponořený do roztavené strusky, postupně se odtavuje a průchodem struskou se rafinuje, tj. zbavuje nekovových vměstků (hlavně síry) a

částečně i odplyňuje. Rafinovaná ocel pak tuhne v krystalizátoru chlazeném vodou. Vzniklý ingot z kvalitní přetavené oceli je po celém průřezu chemicky i strukturálně homogenní a dále se zpracovává obvyklým způsobem. Proud z regulačního transformátoru se přivádí jedním pólem na objímku elektrody a druhým na krystalizátor. Elektroda je posouvána automaticky podle rychlosti odtavování a podle elektrických parametrů strusky.

Elektrostruskové pece se konstruují jednak jako jednofázové, jednak jako trojfázové (pro větší výkony), a to buď se třemi elektrodami do jednoho krystalizátoru nebo jako tři oddělené jednofázové pece. Výkony transformátorů jsou až několik MV·A a pracovní napětí se reguluje v rozmezí od 40 V do 120 V. Chemické složení používaných pracovních strusek určuje jejich tavicí teplotu, rezistivitu a použitelnost (např. pro odsíření oceli apod.).

## 2.2 Nepřímý odporový ohřev

V zařízeních s nepřímým odporovým ohřevem (tzv. *odporových pecích*) se Jouleovo teplo indukuje v topných člancích umístěných přímo v pecním prostoru a na vsázku se pak přenáší převážně sáláním topných článků a vyzdívky, prouděním atmosféry v pecním prostoru, popř. i vedením. Konkrétní způsob přenosu tepla je kritériem k rozdělení pecí do následujících skupin:

- pece s výlučně sálavým režimem – jsou to vysokoteplotní pece, ve kterých se výměna tepla uskutečňuje sáláním ve vakuové vytápěcí komoře (vakuové pece),
- pece se sálavě-konvekčním režimem – vysokoteplotní, případně středoteplotní pece, ve kterých se výměna tepla uskutečňuje převážně sáláním,
- pece s konvekčně-sálavým režimem – středněteplotní a nízkoteplotní pece, ve kterých se výměna tepla uskutečňuje převážně prouděním (ve středněteplotních pecích se tento režim uplatňuje pouze při nucené konvekci pecní atmosféry),
- pece s konvekčně-kondukčním režimem – elektrické odporové vany, ve kterých se teplo na vsázku, ponořenou do tekutého prostředí, přenáší prouděním i vedením,
- pece s infračerveným režimem – využívají přenos tepla na vsázku sáláním ze zdroje (infrazářiče) ve frekvenční oblasti infračerveného záření.

Odporové pece je možné dělit podle několika dalších hledisek:

Podle teploty:

- pece nízkoteplotní – do 600 °C,
- pece středoteplotní – od 600 °C do 1100 °C,
- pece vysokoteplotní – nad 1100 °C.

Podle atmosféry v pecním prostoru:

- pece s normální atmosférou (vzduch),
- pece s řízenou atmosférou (např. pro nauhličování, nitridaci, pro zamezení oxidace aj.),
- pece pracující s vakuem – vakuové pece.

Podle použití v provozu:

- pece pro tepelné zpracování kovů,
- pece pro tavení kovů,
- pece pro tavení skla,
- pece pro chlazení skla,
- pece pro laboratoře, pro domácnosti,
- pece s infračerveným ohřevem atd.

Podle toho, zda se vsázka při ohřevu nepohybuje nebo se pohybuje:

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

K všeobecně použitelným statickým pecím (pecím se stabilní vsázkou) lze počítat pece komorové a šachtové. Speciálnější případy jsou pece vozové, pokloповé (zvonové), elevátorové a kelímkové tavicí.

Odporové pece průběžné se používají tam, kde je předepsáno tepelné zpracování pro větší počet výrobků. Průběžných pecí, které jsou většinou dimenzovány na nižší teploty, se staví celá řada různých druhů. V těchto pecích lze podle technologického procesu provádět předepsaný ohřev, výdrž a ochlazování. Obecně jsou tyto pece vybaveny zvláštními mechanismy, které zajišťují, že vsázka prochází celou délkou pece. Průběžné pece (zejména tunelové) mají ve směru pohybu vsázky více teplotních pásem, která jsou samostatně napájena a regulována. Často na pece navazují tzv. chladicí tunely zajišťující řízené ochlazování vsázky. Několik průběžných pecí může být spojeno a může tvořit jeden zcela mechanizovaný a automatizovaný celek. Většinou se spojují kalicí a popouštěcí pece s kalicími lázněmi, čisticími a sušicími zařízeními. Všechna tato zařízení pracují plně automaticky a mohou být proto použita při pásové výrobě.

Pece jsou konstruované pro trvalý provoz. Průběžné pece větších délek (až několik desítek metrů) se nazývají tunelové; má-li osa průběžné pece kruhový tvar, nazývá se pec karuselová. Podle druhu mechanismu k dopravě vsázky se nejčastěji používají pece pásové a řetězové, válečkové, nárážecí, střešací, krokové, protahovací, bubnové a již zmíněné karuselové.

### 3 Topné články odporových pecí

Topné články jsou v odporových pecích zdrojem tepla. Ohřívají se přímým průchodem proudu a teplo se z jejich povrchu přenáší do prostoru pece při nízkých teplotách převážně prouděním, při vysokých teplotách pak sáláním. Konstruuji se a umísťují v pecích tak, aby splňovaly podmínky pro co nejlepší přenos tepla do pracovního prostoru pece (neměly by být cloněny a jednotlivé články by neměly sálat na sebe). Na materiály pro topné články jsou kladeny vysoké nároky; měly by mít tyto vlastnosti:

- a) *Žárovzdornost* při pracovní teplotě topného článku. Protože obvod válcového vodiče a tím i jeho povrch, vystavený působení kyslíku, roste lineárně s jeho průměrem, avšak jeho průřez a tím i zatížitelnost se čtvercem průměru, je výhodné používat vodičů větších průměrů. U průmyslových pecí se používá minimální průměr topného vodiče 2 mm.
- b) *Dostatečná mechanická pevnost* při vysoké teplotě, aby ve svislé poloze spirály alespoň udržely svou vlastní váhu.
- c) *Velká rezistivita*, aby se topné články zpravidla mohly připojovat přímo na síť bez potřebného transformátoru. Čím větší je rezistivita topného materiálu, tím vyjde jeho průměr větší a délka kratší, což je žádoucí.
- d) *Malý teplotní součinitel odporu*, aby se odpor teplého topného vinutí příliš nelišil od odporu studeného vinutí. Odporové slitiny mívají rezistivitu přibližně  $1 \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ . U čistých kovů (prvků, jako je např. měď, platina atd.) odpor s teplotou značně roste, přibližně o 40 % při stoupnutí teploty o 100 °C. Při zahřátí čistého kovu by se odpor topného článku při stoupnutí teploty o 1000 °C zvětšil přibližně 5krát. Tato skutečnost by způsobila náraz proudu při připojení studené pece k síti, podobně jako při připojení asynchronního motoru s kotvou nakrátko. Při připojení pece by však tento jev trval poměrně dlouhou dobu, řádově až desítky minut. Je-li z nějakého důvodu nutné používat čistého kovu jako topného materiálu, je třeba zařadit spouštěcí transformátor s několika stupni napětí.
- e) *Stálost rezistivity*. Některé topné materiály, zejména nekovové, v provozu „stárnou“, jejich odpor roste a tím se zmenšuje odebíraný příkon a klesá teplota v peci. Je proto třeba zařadit transformátor pro postupné zvyšování napětí s postupujícím „stárnutím“ topných tyčí.
- f) Důležitou vlastností je také pokud možno *stálost rozměrů*; některé články se prodlužují a to je třeba při konstrukci pece uvažovat (např. Kanthal).
- g) Materiály musí být *schopné zpracování*, aby bylo možné zhotovit dráty a pásy různých rozměrů a z nich potom spirály a vlnité topné články. Materiály musí být *schopné svařování*, aby se konce topných článků připojily k vývodům, které procházejí stěnou pece.
- h) *Odolnost proti chemickým vlivům* atmosfér v pecích a keramiky, s níž se v peci stýkají.

Uvedené požadavky jsou velmi náročné. V praxi se daří splnit současně jen některé, popř. pro dosažení maximální životnosti se volí kompromisní řešení.

Topné články mohou být vyrobeny z materiálů kovových nebo z materiálů nekovových. Pro nízkoteplotní a středoteplotní pece (pracovní teploty do cca 1200 °C) vyhovují kovové materiály na bázi austenitických a feritických slitin, pro pece vysokoteplotní (teploty nad 1250 °C) se topné články vyrábí na bázi nekovových materiálů.

### 3.1 Kovové materiály

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

#### 3.1.1 Austenitické slitiny

Austenitické slitiny jsou nemagnetické, tzv. *chromniklové*. Používají se do 1200 °C. Tyto slitiny niklu a chromu jsou nejžakostnější, jsou dobře žárovzdorné (žárovzdornost je vytvořena povrchovou ochrannou vrstvou oxidu chromitého –  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , jehož teplota tavení je vyšší než u vlastní slitiny), odolávají častým zapnutím a vypnutím. Dobře se svařují a formují do článků. Mají vysokou rezistivitu a malý teplotní součinitel odporu, nestárnou a jsou stálé.

Složení, rezistivity a pracovní teploty několika těchto slitin vidíme v tab. 2.

Tab. 2 Rezistivity a pracovní teploty nemagnetických odporových materiálů [1]

| Složení                                            | Rezistivita [ $\mu\Omega\cdot\text{m}$ ] při teplotě [°C] |      |      |      |      |      | Pracovní teplota [°C] |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|-----------------------|
|                                                    | 0                                                         | 200  | 400  | 600  | 800  | 1000 |                       |
| podvojná slitina<br>20 % Cr + 79,7 % Ni + 0,3 % Fe | 1,10                                                      | 1,12 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1250                  |
| potrojná slitina<br>20 % Cr + 60 % Ni + 20 % Fe    | 1,13                                                      | 1,16 | 1,18 | 1,20 | 1,21 | 1,23 | 1100                  |
| potrojná slitina<br>20 % Cr + 35 % Ni + 45 % Fe    | 1,06                                                      | 1,13 | 1,20 | 1,24 | 1,28 | 1,32 | 900                   |

Z přehledu vidíme, že nejlepší je tzv. podvojná slitina (slitina Ni + Cr), která je navíc dobře opracovatelná. S větším podílem niklu roste kvalita slitiny a dovolená pracovní teplota. Přidáváme-li železo, abychom ušetřili drahý nikl, roste teplotní součinitel odporu a rezistivita, snižuje se pracovní teplota, avšak slitina je levnější a má lepší obrobiteľnost. Čím je větší obsah chromu, tím je materiál stálejší a odolnější proti oxidaci, ale hůře obrobiteľný. Proto se většinou používají slitiny, které obsahují 20 % chromu a 80 % niklu. V mnoha případech lze použít slitiny, které obsahují 15 % až 17 % chromu, 50 % až 60 % niklu a zbytek železa (do 1000 °C).

Z dovážených austenitických slitin můžeme jmenovat např. Nikrothal, Chromitherm, Nichrom, Cronix, Cronifer aj. Z tuzemských jsou to zejména AKC (23 % až 27 % Cr + 18 %

až 22 % Ni + zbytek Fe) a Antoxyd (21 % Cr + 38,5 % Ni + zbytek Fe), obě pro teploty do 1000 °C.

### 3.1.2 Feritické slitiny

Jde o magnetické slitiny Cr + Al + Fe (bez niklu). Mají vysokou žáruvzdornost (ochrannou povrchovou vrstvu tvoří  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  a zejména  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) a v porovnání s austenitickými slitinami i vyšší rezistivitu, okolo  $1,4 \mu\Omega \cdot \text{m}$  při 20 °C. Patří sem slitiny jako Kanthal, Alsichrom, Alkrothal, Chromal, Aluchrom, Thermal aj. Mají přibližně stejné složení: 20 % až 25 % chromu a 4 % až 5,5 % hliníku, zbytek železo, popř. velmi malé množství dalších kovů (např. Kanthal je 20 % Cr + 5 % Al + 0,5 % Co + zbytek Fe). Pracovní teploty feritických materiálů jsou až do 1375 °C, rezistivita se s teplotou mění velmi málo (při ohřevu z 20 °C na 1300 °C stoupne asi o 6 %).

Ochranná vrstva  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se na povrchu vodičů tvoří až při teplotě nad 1000 °C, proto se tyto slitiny nemají používat pro teploty nižší v případech, kdy by se ochranná vrstva poškozovala (např. chemicky). Topné články z feritických slitin jsou výhodné zejména tam, kde se vyskytuje síra (ta však rychle ničí články ze slitin obsahujících nikl).

Kanthalové články jsou křehké. Topné spirály se vyrábějí z drátu zahřátého na 400 °C až 700 °C. Kanthal je výhodný v případě, že se pec zřídka kdy zapíná a vypíná. Při přerušovaném chodu totiž nastává růst krystalů v topném materiálu, články jsou křehké a v případě zlomení je sváření velmi obtížné. Nedoporučuje se proto topné články, které v peci již pracovaly, přemísťovat nebo svařovat.

Topné články musí být v peci uchyceny tak, aby byly odlehčeny i od své vlastní tíhy. Pevnost zatepla u nich klesá a vhodně nepodepřené topné vodiče se při nejvyšších teplotách mohou vlastní tíhou přetrhnout nebo nepřipustně deformovat. Zvláště je třeba dbát (i v případě austenitických slitin), aby keramické tvárnice, o které se topné články opírají, neobsahovaly alkalie (vodní sklo) a oxidy železa, které při vysoké teplotě rychle ničí ochrannou vrstvu z oxidu hlinitého a tím může nastat přetavení článku. Oxid hlinitý má tendenci se odlupovat, zejména při častém zapínání. Hliník z vnitřku vodiče pak difunduje k povrchu a tvoří novou ochrannou vrstvu. Tím se však slitina postupně ochuzuje o hliník a snižuje se její žáruvzdornost. Stárnutím odpor topného článku roste, zvětšuje se jeho délka až o 40 % a při nevhodné konstrukci článků může dojít ke zkratům (např. závitovým aj.).

### 3.1.3 Čisté kovy

Pro malé laboratorní nebo jiné speciální pece, kde se požaduje značně vysoká teplota, se používá jako topných vodičů drahých, těžkotavitelných kovů – zejména platiny, molybdenu a wolframu. Jejich nevýhodou je však omezené použití pouze ve vakuu nebo v redukční atmosféře.

*Platina* se používá na malé pece s příkonem 1 kW až 2 kW pro teploty až 1400 °C. Protože se její odpor značně mění s teplotou, způsobí zapnutí za studeného stavu velký

proudový náraz. Platina neoxiduje ani při malých průřezích vodiče, avšak intenzivně se nauhličuje a nemůže proto pracovat v redukční atmosféře.

*Molybden* se používá pro teploty 1400 °C až 2000 °C, vyžaduje však ochrannou atmosféru (páry lihu nebo vodík). Ve vakuu se rozprašuje při teplotě 1650 °C. Molybden má vysoký teplotní součinitel odporu (při teplotě 2000 °C je rezistivita 10krát vyšší než za studena), proto pec osazená molybdenovými články vyžaduje regulační transformátor.

*Wolfram* je velmi křehký, topné články se dělají ve tvaru trubky, přičemž její vnitřní prostor je vlastní pec. Zvláštní konstrukci vyžadují přívody do trubky, které musí být chlazené vodou. Wolfram může ve vakuu nebo ve vodíku pracovat až do 2700 °C.

V ochranných plynech nebo ve vakuu lze dále použít topné články z niobu (do 2300 °C) nebo tantalu.

### 3.1.4 Ocel a speciální odporové slitiny

*Ocelový drát* lze v normální atmosféře použít do teploty 400 °C, ve vodíkové atmosféře až do 900 °C. Rezistivita se značně mění s teplotou, proto je třeba počítat s velkým nárazem v síti při zapnutí zastudena. Je levný, používá se v sušicích pecích nejvýše do 400 °C.

*Konstantan* (56 % Cu + 44 % Ni), *Nikelin* (65 % Cu + 34 % Ni + 1 % Fe), příp. *Manganin* (97 % Ni + 3 % Mn) jsou speciální slitiny na bázi mědi a niklu. Mají nízkou rezistivitu a jejich odpor se s teplotou téměř nemění. Používají se hlavně v měřicí a regulační technice. Dají se však použít také pro topné články do malých spotřebičů a nižší teploty.

## 3.2 Nekovové materiály

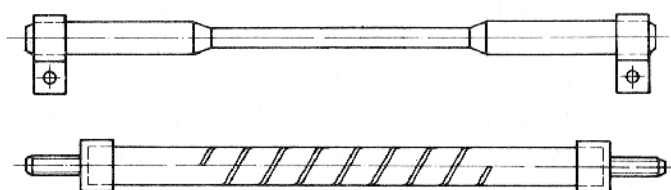
Pracovní teploty kovových topných článků dosahují nejvýše 1375 °C, proto se hledaly materiály, které při stejných základních vlastnostech jako u kovových mohou pracovat v normální atmosféře při teplotách vyšších. Těmto požadavkům vyhovuje několik materiálů nekovových.

### 3.2.1 Karbid křemíku (SiC)

Topné články z karbidu křemíku se používají pro teploty až do 1500 °C. Rezistivita SiC je ve srovnání s kovovými materiály značně velká (0,6 mΩ·m až 3,0 mΩ·m). Proto je možné vyrábět topné články ve tvaru tyčí se zesílenými konci nebo trubek se stěnou proříznutou ve tvaru závitů v pracovní části (obr. 17). Průměry tyčí jsou 12 mm až 50 mm, délky od 80 mm do 2000 mm. Topné články se montují většinou vodorovně pod strop a na dno, mohou se umísťovat i svisle na bočních stěnách. SiC články jsou v teplém stavu křehké a mají relativně malou pevnost. Jejich přívody mají být poddajné, aby se mohly roztahovat. Jsou náchylné na rychlé ohřátí a stárnutí, tzn., že časem roste jejich odpor. Proto se pece s těmito články připojují přes regulační transformátory s několika odbočkami, takže napěťová rezerva je 40 %

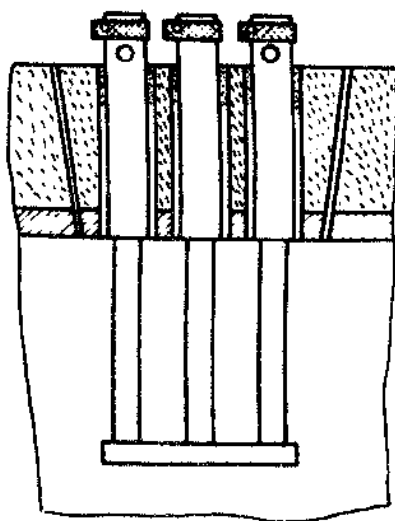
až 70 %. Protože všechny topné články nestárnou stejně, není dobré je řadit do série. Teplotní součinitel odporu je do 800 °C záporný (odpor mírně klesá), nad 800 °C kladný (odpor roste).

Technický život topných článků je od 3000 do 10000 pracovních hodin, při nejvyšší pracovní teplotě se život zkracuje. Dále závisí na počtu zapnutí a vypnutí, na chemických vlivech pecní atmosféry (síra a oxidy kovů škodí) atd. Problémy způsobují přívody pro velké proudy do topných článků. Umísťují se na zesílené, obvykle pokovené (Al, Ag) konce tyčí, které mají mnohem menší odpor (průřez konců je 6krát až 8krát větší než pracovní části), a jsou proto chladnější než střední část, která je v peci zdrojem tepla. Zesílené konce tyčí procházejí stěnou pece. Přívody proudu jsou vně pecního prostoru, někdy jsou i chlazené vodou. Používají se zejména typizované, speciální objímky a držáky, které jsou dodávány přímo s topnými články. Jejich konstrukce respektují i tepelnou roztažnost článků.



Obr. 17 Topné články SiC [1]

Obchodní názvy topných článků z karbidu křemíku jsou Silit, Globar, Crusilit, Cesiwid aj. Mimo články ve tvaru tyčí se používají i články trojfázové (3 svislé tyče spojené vodorovnou tyčí) pro svislé umístění v peci (obr. 18).

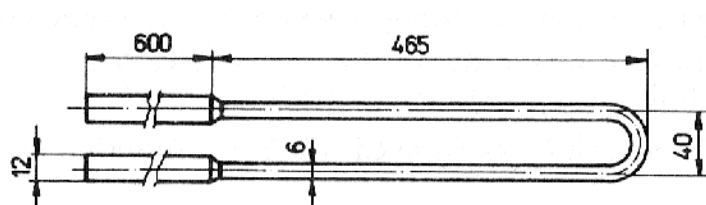


Obr. 18 Trojfázový topný článek SiC [2]

### 3.2.2 Cermetové články

Jsou vyráběny práškovou metalurgií na bázi keramiky (cer) a kovů (met), odtud název *Cermet*. Základem je směs molybdenitu křemičitanů ( $\text{MoSiO}_2$ ) s oxidem křemičitým ( $\text{SiO}_2$ ). Tyto topné články se zhotovují lisováním v konečné podobě a zpevní se zahřátím na vysokou teplotu, při které nastane slinutí částic k sobě. Články jsou nejčastěji ve tvaru U (tzv. *vlásenky*) podle obr. 19. Rozměrově jsou různé podle výkonů. Mohou být také ve tvaru tyčí, trubek se stěnou proříznutou ve tvaru závitu v pracovní oblasti apod. Konce pro připojení přívodů proudu jsou zesílené a upravené stejně jako u článků z SiC.

Pracovní teploty článků jsou 1600 °C až 1800 °C. Žárovzdornost způsobuje ochranná vrstva  $\text{SiO}_2$  vznikající na povrchu článku za provozu. Zastudena jsou cermetové články tvrdé a křehké, nesnášejí otřesy. Při teplotách nad 1400 °C jsou měkké a plastické, takže se nemohou instalovat vodorovně bez podpěry. Do 1600 °C je lze použít s podpěrrou, nad tuto teplotu lze použít výše zmíněné tzv. vlásenky, které jsou zavěšené ve svislé poloze. Články jsou odolné proti atmosféře oxidační, dusíkové, argonové a z CO. Vakuum nesnášejí (vypařuje se Si), škodí jim síra a chlor.



Obr. 19 Cermetový článek na příkon 3,33 kW [1]

Rezistivita těchto materiálů se mění značně s teplotou (při 20 °C je rezistivita 0,25  $\mu\Omega\cdot\text{m}$ , při 1600 °C je 3,5  $\mu\Omega\cdot\text{m}$ ), proto se připojují přes regulační transformátory, pec je třeba roztápet při sníženém napětí.

Nejznámější jsou výrobky pod názvem Kanthal Super a Mosilit.

### 3.2.3 Uhlíkové a grafitové topné články

Grafitové články mohou pracovat ve vakuu nebo v řízené atmosféře, která zabraňuje oxidaci, do 2600 °C. Vyrábějí se jako tyče, trubky a desky. Přívody proudu jsou mimo pecní prostor, speciální kontaktní objímky se dodávají společně s tyčemi. Při normální atmosféře nastává oxidace u uhlíkových článků zhruba od 400 °C, u grafitových zhruba od 600 °C.

U uhlíkových topných tyčí klesá rezistivita z hodnoty 100 % při 0 °C na 67 % při teplotě 1400 °C. Poněkud jinak se chová grafit. Označíme-li jeho odpor při 0 °C 100 %, potom při 400 °C má 77 % a pak opět stoupá, takže při 1400 °C má 96 % původní hodnoty. S teplotou značně klesá tepelná vodivost grafitu – při 2000 °C jen asi na 12 % z hodnoty při 0 °C.

Uhlíkové drtě se používá také ve zvláštních pecích, tzv. *kryptolových*, zpravidla pro laboratorní účely, k dosažení teploty 1400 °C až 1700 °C. Mezi keramickou vnitřní trubku a vnější plášť se nasype *uhlíková drť* o zrnění 2 mm až 3 mm. Touto drtí prochází proud a tím vzniká v dutině trubky, která je pracovním prostorem, teplo.

### 3.3 Konstrukce topných článků

Podle způsobu přenosu energie z povrchu článku na vsázku rozeznáváme dvě konstrukce topných článků:

- *otevřené* – články s volně vyzařujícím povrchem,
- *uzavřené* – články, z jejichž povrchu se teplo přenáší do okolí (na vsázku) přes izolant, vyztužený kovovým krytem.

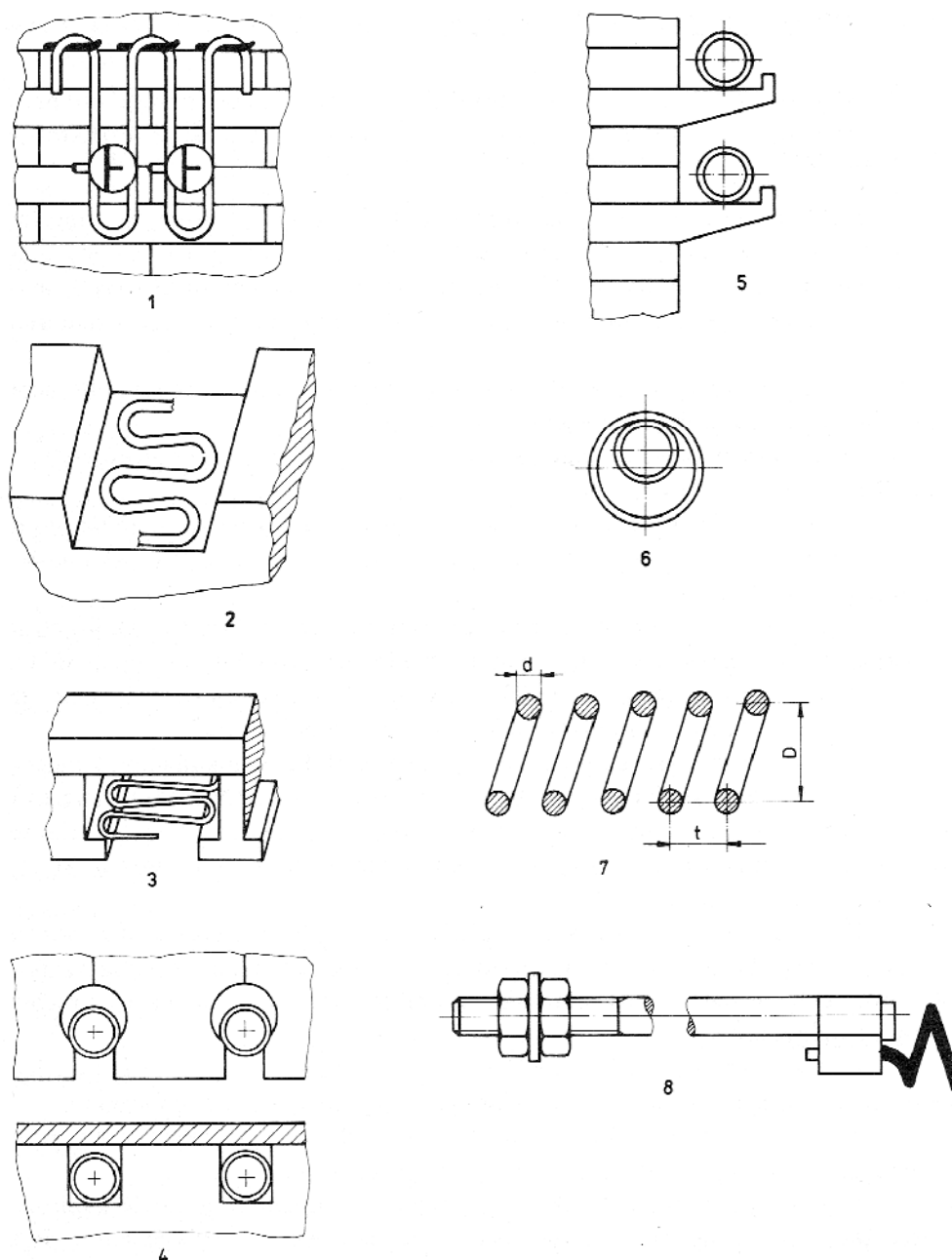
Toto rozdělení se týká pouze článků kovových; nekovové se vždy konstruuji s volně vyzařujícím povrchem.

Konstrukce topných článků je odvozena od jmenovité teploty pece, požadovaného tvaru a způsobu použití, od mechanických vlastností a možného vlivu pecní atmosféry. Zároveň musí vyhovovat požadavku kontroly a snadné vyměnitelnosti i v průběhu provozu.

#### 3.3.1 Otevřené topné články

Články se vyrábějí zpravidla jako polotovary ve formě drátu nebo pásu, které se formují do spirál a plochých smyček (dráty) nebo meandrů (pásy i dráty), aby se získala potřebná délka vodiče na příslušném úseku pracovní komory pece. Články nejsou ničím kryté a teplo z jejich povrchu se do pecního prostoru se vsázkou přenáší sáláním, prouděním, příp. i vedením. Upevnění v peci je různé: jsou zavěšeny na stěnách na kovové nebo keramické háky nebo jsou vloženy do drážek speciálních tvárnic ve stěnách, stropě a ve dně atp. S keramikou se mají články stýkat minimálně, jen v podpěrných bodech. Správně formovaný topný článek musí také odpovídat podmínkám dobrého šíření tepla (tj. dobrého chlazení povrchu). Vzájemné osálení jednotlivých částí toho samého článku má být minimální, aby se dodatečně nezvyšovala teplota povrchu článku a tím i jeho povrchové zatížení. Obecně pro konstrukci spirál a meandrů platí, že s růstem pracovní teploty má být jejich stoupání větší (tj. menší hustota závitů resp. vln).

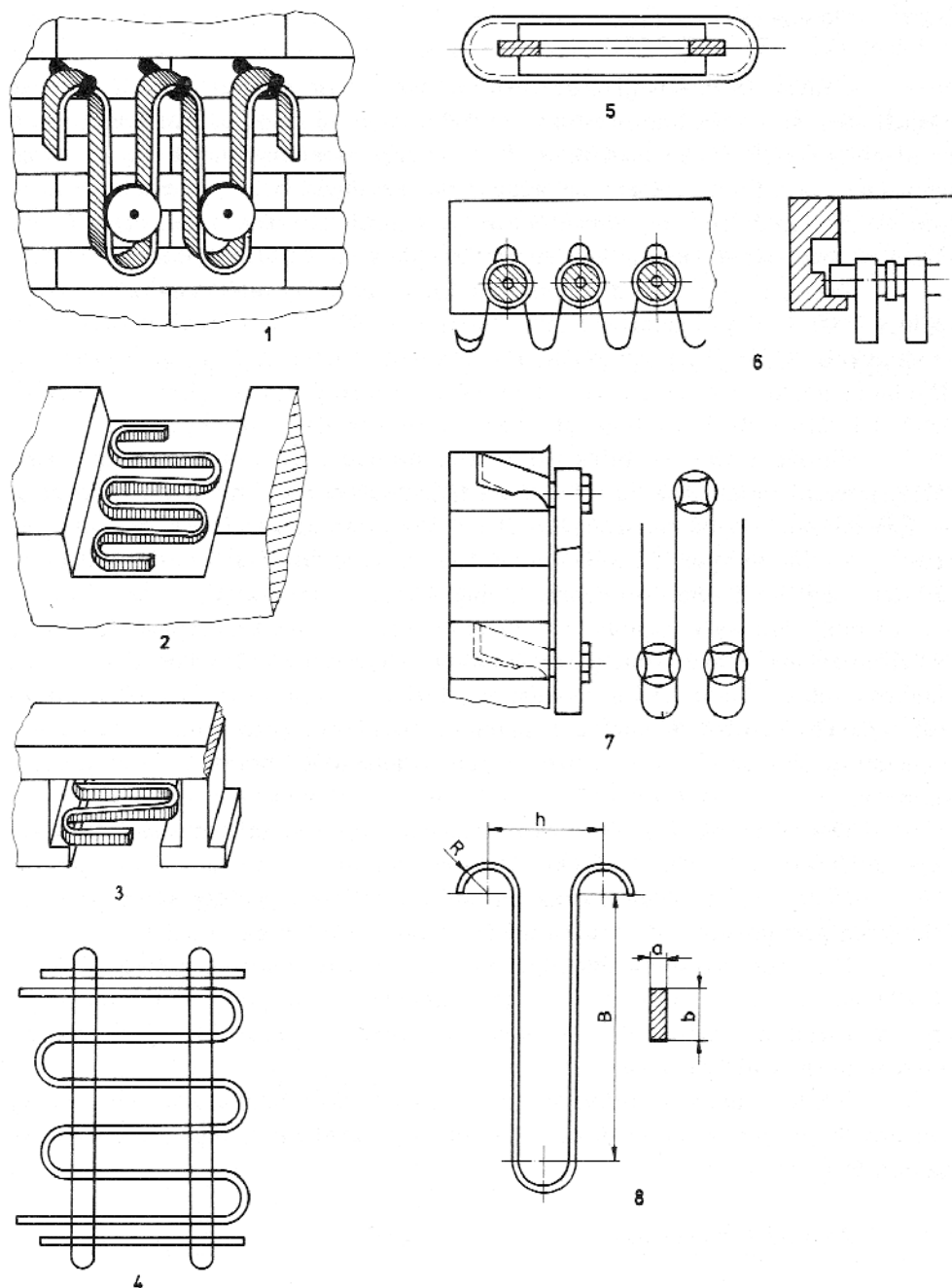
Pro průmyslové pece se nejvíce používá drát o průměru 3 mm až 7 mm. Pro pece nad 1000 °C se doporučuje použít drát o průměru nad 5 mm. Obvykle se z něj navíjí spirála se stoupáním  $t$  rovným  $2d$  až  $3d$  ( $d$  je průměr drátu) a minimálním středním průměrem  $D = 6d$ . Navíjí se z předem vyžíhaných drátů (žíhací teplota cca 750 °C), a to buď za tepla nebo za studena. Drátové elementy se vyrábějí i ve tvaru meandrů. Stoupání meandrů nemá být menší než  $3d$  a délka ramene nemá být větší než  $30d$ . U chromniklových a chromhliníkových drátů je průměr ohybu  $6d$  až  $7d$  při teplotách do 1000 °C a  $4d$  až  $7d$  při teplotách nad 1000 °C.



Obr. 20 Provedení a uložení topných drátových článků – 1 ve tvaru meandru, zavěšení na kovových háčích, 2 umístění v podlaze, 3 umístění ve stropu, 4 ve tvaru spirály, uložení ve stropních a podlahových tvárnicích, 5 umístění na prodloužených nosných tvárnicích, 6 umístění na keramické trubce, 7 rozměry pro výpočet, 8 připojení topného článku [1]

Pásové topné články se vyrábějí jako meandry různých rozměrů (mají velký sálavý povrch). Šířka pásu  $b$  se pohybuje od  $5a$  do  $20a$ , obvykle však  $10a$  ( $a$  je tloušťka pásu), stoupání meandru  $h$  je asi  $1,8b$ , poloměr ohybu  $R$  nejméně  $4a$  až  $5a$  (nemá být menší než  $3a$  s ohledem na vznik trhlin při ohýbání). Výška meandru umístěného ve stěně má být 150 mm až 600 mm; každých 200 mm mají být distanční vložky. Jsou-li meandry ve stropu nebo dně, má být výška  $B$  meandru maximálně 250 mm. Pro vodiče Cr-Al-Fe a teploty do 1200 °C má

být výška meandru ve stěně nejvýše 250 mm, ve stěně a dně nejvýše 150 mm. Do 1000 °C se používá pás  $1 \times 10$  (mm), pro vyšší teploty  $2 \times 20$  (mm). Pro tzv. *řetězové topné články* se používají zvlněné tenké topné pásy, které jsou dobře ohebné. Z nich se sestaví článkový řetěz s keramickými izolačními vložkami. Jsou vhodné k žhání svarů trub velkých rozměrů, k ohřevu kapalin ve skleněném potrubí, k ohřevu kotlů v chemii aj. Obvykle pracují na nižší napětí.



Obr. 21 Provedení a uložení topných pásových článků – 1 ve tvaru meandru, zavěšení na kovových háčích, 2 umístění v podlaze, 3 umístění ve stropu, 4 vyměnitelný rámový topný článek, 5 průřez nízkoteplotního rámového článku, 6 na keramických trubkách, 7 meandr na vyjímatelných keramických nosičích, 8 rozměry pro výpočet [1]

Dobře navržené a správně provozované chromniklové topné články mají životnost 10000 až 15000 pracovních hodin. V některých případech se používá při malých napětích ražených profilů nebo litých topných článků. Lité topné články jsou spolehlivé a mají životnost až několik desítek tisíc hodin.

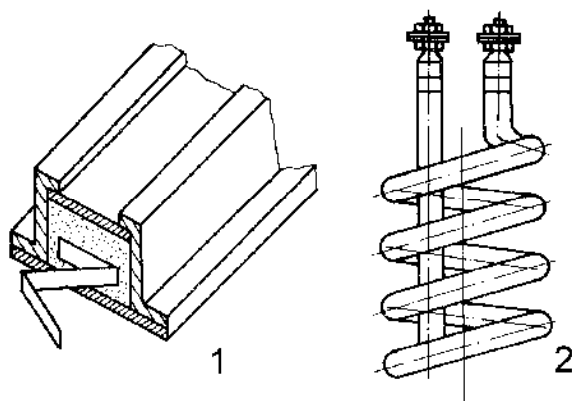
Malé průřezy vodičů vykazují život menší než průřezy větší, proto se u menších pecí používá někdy nižší napětí, průřezy pak vyjdou větší.

Pro malé výkony (domácí spotřebiče) se používají dráty s průměry 0,2 mm až 0,7 mm, z nichž se navine na trnu s průměrem asi 3 mm spirála a ta se teprve po určitém roztažení závitů od sebe navíjí nejčastěji do šroubovicové drážky na povrchu nosné trubky či tyče.

Některé možnosti provedení a uložení topných článků jsou schematicky znázorněny na obr. 20 (topné články drátové) a na obr. 21 (topné články pásové).

### 3.3.2 Uzavřené topné články

Velkou předností uzavřených topných článků je oddělení (obvykle hermetické) topného vodiče od pecní atmosféry nebo od ohřívaného média. Tím je vodič dokonale izolován od chemických, ale i mechanických vlivů okolí. Článků pak lze použít také jako ponorných k ohřevu kapalin. Nejběžnějším druhem jsou tzv. *trubkové články* známé z domácích spotřebičů (plotýnky vařičů, tělesa do žehliček, topná tělesa v pračkách a zásobnících teplé vody apod.). Jsou to ocelové trubky, v jejichž ose je spirála a prostor mezi trubkou a spirálou je vyplněn oxidem hořečnatým (MgO), který je výborným elektrickým izolátorem a tepelným vodičem. Trubkové články lze použít k ohřevu vzduchu, vody, oleje, k tavení snadno tavitelných kovů apod. Vyrábějí se s výkonem od stovek W do několika kW a pro teploty až do 500 °C. Pro vyšší teploty se používají žáruvzdorné trubky. Pro zvýšení předaného tepla do okolí se může povrch článků zvětšit žebry nalisovanými na krycí trubku. Zavřené články mají malé akumulované teplo, malý tepelný odpor mezi topným drátem a ohřívaným médiem, umožňují proto rychlé ohřevy kapalin.



Obr. 22 Uzavřené topné články – 1 jednoduchý uzavřený článek, 2 trubkový článek (běžný typ topné spirály) [3]

## 4 Základy návrhu a výpočtu odporových pecí

Pro správné stanovení druhu pece pro požadovaný způsob tepelného zpracování vsázky jsou rozhodující zejména tato hlediska:

- technologické požadavky na tepelné zpracování vsázky,
- druh vsázky a její velikost,
- hmotnost vsázky ke zpracování za jednotku času,
- průběh teplotního režimu, maximální teplota (rychlost ohřevu, konečná teplota, doba výdrže na určité teplotě, rychlost ochlazování apod.),
- rovnoměrnost a přesnost dodržení teploty,
- přirozená či řízená atmosféra v peci,
- přetržitý nebo nepřetržitý provoz,
- prostor, který je k dispozici,
- cena pece.

Zpravidla je výsledný projekt kompromisním řešením mezi technologickým návrhem, ekonomickým zhodnocením a zkušenostmi projektanta. Projekt pece přirozeně předpokládá souběžný výpočet jejích charakteristických parametrů, který je možné rozdělit do tří dílčích úloh v následujícím pořadí:

1. Stanovení rozměrů pracovního prostoru a optimalizace vyzdívky pece. Rozměry pracovního prostoru (komory pece) musí zohledňovat velikost vsázky, manipulaci s ní, osazení topných článků, jejich jednoduchou vyměnitelnost apod. Rozměry nemají být předdimenzované, aby se zbytečně nezvětšoval vnější povrch pece, se kterým rostou tepelné ztráty. Návrh materiálu a tloušťky vyzdívky a tepelných izolací musí vycházet z tepelných ztrát dvojího druhu – akumulace a přestupu tepla do okolí – a jejich vlivu na tepelnou účinnost pece podle charakteru provozu (periodický nebo průběžný provoz).
2. Tepelný výpočet odporové pece s cílem určení elektrického příkonu pece, měrné spotřeby elektrické energie a tepelné účinnosti. K tomu je třeba vypočítat celkovou spotřebu tepla včetně tepelných ztrát pro daný provozní režim pece a dobu ohřevu vsázky, závislou na její tepelné velikosti, zvoleném teplotním režimu a na způsobu výměny tepla mezi články a vsázkou.
3. Elektrický výpočet odporové pece, kterým se stanovují rozměry, počet a rozdělení topných článků do skupin (např. v průběžných pecích do jednotlivých teplotních zón).

Pro kusovou nebo malosériovou výrobu zvolíme pec nebo skupinu pecí se stabilní vsázkou, pro výrobu hromadnou jsou výhodnější pece průběžné nebo celé automatické průběžné pecní linky. Obvykle se pro daný účel podle zkušeností nebo orientačním výpočtem určí předběžné základní parametry pece (velikost, mechanizace, příkon a další). Potom se pec přibližně navrhne konstrukčně včetně volby tepelných izolací, jejich tloušťek atd. Tento první přibližný návrh se kontroluje již výpočty podrobnějšími. Provedou se v něm příslušné korekce a zpřesnění. Tento druhý návrh se opět výpočtově, daleko podrobněji, kontroluje. Kontrolují

se zejména základní rozměry pece z hlediska dané výrobní technologie, pro kterou je pec určena, tepelná izolace a tepelné ztráty, příkon, účinnost, průběhy teplot, výrobnost a další.

## 4.1 Ztrátový výkon

Pro zpracovaný základní konstrukční návrh pece při známé teplotě nebo rozdělení teplot v peci vypočítáme ztrátový výkon  $P_z$  pece v ustáleném stavu. Ztrátový výkon je určen ztrátami:

- jednotlivými stěnami pece,
- netěsnostmi (např. dveří a vozu u pecí s nepohyblivou vsázkou),
- na vstupu a výstupu u průběžných pecí
- při otevírání a zavírání dveří,
- vynášením tepla dopravními mechanismy u průběžných pecí (pásky, řetězy, žlaby aj.),
- pro ohřev muflí, palet, podložek apod.

Ztrátový výkon je možné rozdělit na ztrátový výkon naprázdno  $P_{z0}$  (nezávisí na chodu pece se vsázkou) a na ztráty  $P_{zv}$  související s chodem pece se vsázkou. Platí

$$P_z = P_{z0} + P_{zv} . \quad [W] \quad (4)$$

$P_{z0}$  souvisí s výše uvedenými body a, b, c;  $P_{zv}$  s body d, e, f. Výpočet  $P_{z0}$  a  $P_{zv}$  provádíme podle obecných zákonitostí šíření tepla v ustáleném stavu a podle měrné tepelné kapacity, teploty a hmotnosti u ztrát paletami, muflemi, podložkami apod. Ztráty netěsností dveří a při otevírání dveří buď odhadneme podle zkušeností, nebo je vypočítáme podle různých empirických vzorců uvedených v literatuře (např. na vstupu a výstupu u průběžných pecí). Každý odhad nebo hodnotu vypočítanou podle empirického vztahu lze kontrolovat obecně platným výpočtem, jestliže si určíme zjednodušené provozní předpoklady (např. šířku spáry při netěsnosti, dobu otevření dveří při vkládání a vyjímání vsázky atd.).

## 4.2 Užitečný výkon

K ohřátí vsázky s hmotností  $m$  a měrnou tepelnou kapacitou  $c$  z teploty  $Q_0$  na teplotu  $Q_k$  je zapotřebí energie

$$W_u = \int_{Q_0}^{Q_k} cm dQ . \quad [J] \quad (5)$$

Pokud zavedeme střední měrnou tepelnou kapacitu  $c_{av}$ , zjednoduší se vztah (5) na tvar

$$W_u = c_{av} m (Q_k - Q_0) . \quad [J] \quad (6)$$

Pokud je v zadání uvedena doba ohřevu  $t_{ohř}$ , vyšel by užitečný příkon

$$P_u = \frac{W_u}{t_{\text{ohř}}} \quad [\text{W}] \quad (7)$$

a teoretický potřebný výkon pece by byl dán vztahem

$$P'_p = P_z + P_u. \quad [\text{W}]$$

Protože však musíme počítat s určitou nepřesností výpočtu, s občasnou potřebou zvýšeného výkonu pece, s rezervou na pokles napětí v síti o více než 5 % až 10 %, se stárnutím topných článků, se vzrůstem ztrát pece apod., volíme určitý bezpečnostní činitel  $k_b = 1,2$  až  $1,7$ . Průběžné pece, které pracují bez přerušení, mívají součinitele bezpečnosti  $1,2$  až  $1,3$ . Pece pracující periodicky mívají vyšší součinitel ( $1,4$  až  $1,5$ ), aby se mohly rychleji prohřát na požadovanou teplotu. Pak příkon pece je

$$P_p = k_b (P_z + P_u). \quad [\text{W}] \quad (8)$$

V praxi však většinou ohřívací dobu vsázky neznáme a musíme ji vypočítat. Pro výpočet známe dobře vsázku, pec a její pracovní teplotu.

### 4.3 Výpočet doby ohřevu vsázky

Těleso v peci přijímá teplo svým povrchem, a to dvěma způsoby: sáláním a prouděním (konvekcí). Z malé části i vedením, a to pouze na počátku ohřevu stykem vsázky s ohřátou podlahou, dopravním pásem apod. Vedení tepla obvykle zanedbáváme, což představuje určitou rezervu.

Pro přenos tepla prouděním platí podle Newtonova zákona vztah

$$P_u = a A (Q - Q'), \quad [\text{W}] \quad (9)$$

přičemž

$$a = a_s + a_k, \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (10)$$

kde  $P_u$  je užitečný výkon přenášený do vsázky povrchem  $A$ ,  
 $\alpha$  výsledný součinitel přestupu tepla z pece do vsázky,  
 $\alpha_s$  součinitel přestupu tepla sáláním,  
 $\alpha_k$  součinitel přestupu tepla konvekcí,  
 $Q$  teplota pece,  
 $Q'$  teplota vsázky.

Jak již bylo řečeno, přestup tepla z nějaké pevné plochy do okolního prostředí nebo naopak se děje vlastně dvojím způsobem, a to čistým prouděním (plynu, kapaliny) a sáláním. V součiniteli  $\alpha$  je tedy zahrnuto jak šíření tepla prouděním, tak i sáláním. Při nižších teplotách (asi do  $150^\circ\text{C}$ ) hraje větší roli  $\alpha_k$ , při vyšších potom narůstá u pevných těles  $\alpha_s$  natolik, že se

$\alpha_k$  může téměř zanedbat. Při teplotách vyšších (nad 500 °C – např. uvnitř elektrických odporových pecí) lze pro daný nebo očekávaný rozsah teplot dosti přesně vypočítat  $\alpha_s$ , které potom můžeme přibližně považovat za výsledné  $\alpha$ ;  $\alpha_k$  zanedbáme a  $\alpha_s$  určíme ze vztahu

$$a_s(Q_1 - Q_2)A = P = s_\epsilon e A(Q_1^4 - Q_2^4).$$

Na levé straně je zákon Newtonův, na pravé straně je zákon Stefanův-Boltzmannův pro šíření tepla sáláním. Pro náhradní součinitel přestupu tepla sáláním v určitém menším rozsahu teplot pece  $Q$  a vsázky  $Q'$  dostaneme

$$a_s = \frac{s_\epsilon e (Q^4 - Q'^4)}{Q - Q'}, \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (11)$$

kde  $e$  je emisivita (stupeň černosti) povrchu vsázky,

$s_\epsilon$  Stefanova-Boltzmannova konstanta (součinitel sálání absolutně černého tělesa),  $s_\epsilon = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ .

Pec má vnitřní povrch mnohonásobně větší, než je povrch vsázky, stupeň černosti vnitřního povrchu pece  $e = 0,8$  až  $0,9$ .

Obvykle bereme při přirozeném proudění ovzduší v peci hodnotu součinitele přestupu tepla konvekcí  $\alpha_k$  rovnou přibližně  $15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ; potom je

$$a = a_s + 15. \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (12)$$

Povrchem  $A$  přijímá vsázka teplo. Tento povrch tvoří podle umístění v peci a podle vzájemného stínění kusů vsázky jen část celkového povrchu  $A_v$  vsázky

$$A = k_v A_v, \quad [\text{m}^2] \quad (13)$$

kde  $k_v$  je redukční činitel ( $k_v < 1$ ); určuje se obvykle podle praktických zkušeností.

Při výpočtu dále předpokládáme, že vsázka je tzv. tepelně tenká. U takové vsázky teplota vnitřku vsázky sleduje teplotu jejího povrchu téměř bez časového zpoždění. V každém časovém okamžiku lze vsázku posuzovat jako rovnoměrně prohřátou. Pro tepelně tenkou vsázku platí

$$Bi < 0,25,$$

přičemž

$$Bi = \frac{a s}{2l},$$

kde  $Bi$  je Biotovo podobnostní kritérium,

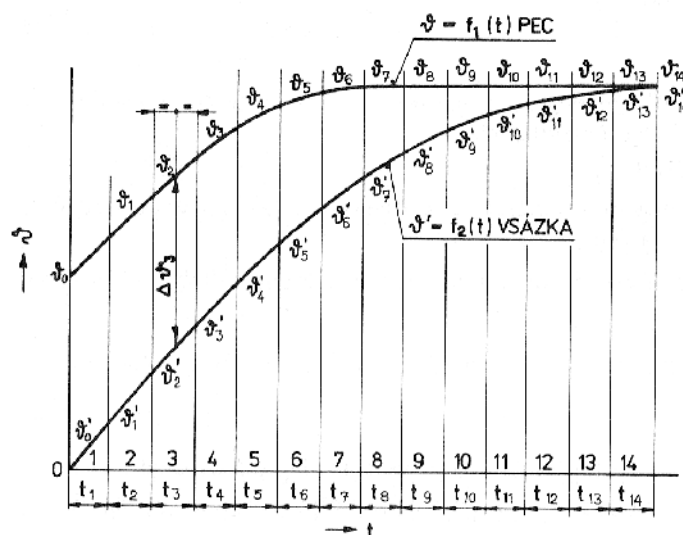
$s$  reprezentativní tloušťka stěny vsázky, určující její masívnost (může to být největší tloušťka u rovinné vsázky, největší průměr vsázky válcové apod.),

$l$  tepelná vodivost vsázky.

Pro  $Bi > 0,5$  je vsázka již tzv. tepelně masívní. Vnitřek vsázky je v daném okamžiku chladnější než její povrch.

#### 4.3.1 Výpočet doby ohřevu v el. odporové peci se stabilní vsázkou

Dobu ohřevu  $t_{ohř}$  a oteplovací křivku vsázky  $Q' = f_2(t)$  můžeme určit pomocí graficko-početní iterační metody s podmínkou, že budeme považovat časový průběh teploty vnitřku pece během jednoho pracovního cyklu za známý. Obvykle je teplota vnitřku pece v převážné části pracovního cyklu konstantní, udržovaná automatickým regulátorem teploty ( $Q = \text{konst.}$ ), jak je patrné z obr. 23.



Obr. 23 Teplotní křivky pece a vsázky [1] (v textu je místo symbolu  $J$  uváděn symbol  $Q$ )

Na osu času vyneseme libovolné časové intervaly (kroky)  $t_1, t_2, t_3$  až  $t_n$ , jejichž hostota je závislá na požadované přesnosti výpočtu. Nejlépe je zvolit je stejně dlouhé ( $t_1 = t_2 = \dots = t_n$ ). Křivku průběhu teploty vsázky počítáme postupně – začínáme s  $Q'_0$  a počítáme  $Q'_1$ , pak následuje výpočet  $Q'_2$  z určené  $Q'_1$  atd. Např. pro krok 3 (interval  $t_3$ ) platí

$$a_3 A \Delta Q_3 t_3 = m c_3 (Q'_3 - Q'_2), \quad (14)$$

kde levá strana odpovídá energii předané do vsázky v intervalu  $t_3$  a pravá strana teplotu akumulovanému vsázkou. Na základě vztahů (10) a (11) je součinitel přestupu tepla  $\alpha_3$  z pece do vsázky v intervalu 3 dán vztahem

$$a_3 = a_{3s} + a_{3k} = \frac{s_e e (Q_{3s}^4 - Q_{3s}'^4)}{Q_{3s} - Q_{3s}'} + 15, \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (15)$$

kde

$$Q_{3s} = \frac{Q_2 + Q_3}{2} \text{ [K]}; \quad Q'_{3s} = \frac{Q'_2 + Q'_3}{2} \text{ [K]} \quad \text{atd.}$$

Teplotu  $Q'_{3s}$  musíme zatím určit extrapolací křivky  $Q' = f_2(t)$  na základě již vypočítaného průběhu této křivky v předchozích krocích. Z obr. 23 vyplývá pro střední teplotní rozdíl  $\Delta Q_3$  mezi pecí a vsázkou v intervalu 3

$$\Delta Q_3 = \frac{Q_2 + Q_3}{2} - \frac{Q'_2 + Q'_3}{2} = \frac{1}{2}(Q_2 - Q'_2 + Q_3 - Q'_3). \quad \text{[K]} \quad (16)$$

Dosažením za  $\Delta Q_3$  do rovnice (14) bude

$$\frac{1}{2} a_3 At_3 (Q_2 - Q'_2 + Q_3 - Q'_3) = m c_3 (Q'_3 - Q'_2) \quad (17)$$

a z této rovnice již vypočítáme hledanou teplotu  $Q'_3$

$$Q'_3 = \frac{\frac{1}{2} a_3 At_3 (Q_2 - Q'_2 + Q_3) + m c_3 Q'_2}{\frac{1}{2} a_3 At_3 + m c_3}. \quad \text{[K]} \quad (18)$$

Pro obecný  $n$ -tý interval platí

$$Q'_n = \frac{\frac{1}{2} a_n At_n (Q_{n-1} - Q'_{n-1} + Q_n) + m c_n Q'_{n-1}}{\frac{1}{2} a_n At_n + m c_n}. \quad \text{[K]} \quad (19)$$

Je-li nutné respektovat změnu  $c_n$  s teplotou, odečítáme ji z tabulky vždy pro střední teplotu vsázky danou vztahem

$$Q'_{ns} = \frac{Q'_{n-1} + Q'_n}{2}. \quad \text{[K]}$$

Teplotu  $Q'_n$  musíme opět určit předběžně extrapolací křivky  $Q' = f_2(t)$  do  $n$ -tého intervalu na základě jejího průběhu v předešlých intervalech.

Podle rovnice (19) vypočítáme postupně celou křivku  $Q' = f_2(t)$ . Po dosažení požadované konečné teploty vsázky (např.  $Q'_{14}$  v obr. 23), která se blíží teplotě pece ( $Q_{14}$ ), sečteme všechny časové intervaly  $t_1, t_2$  atd. a dostaneme celkovou potřebnou dobu ohřevu

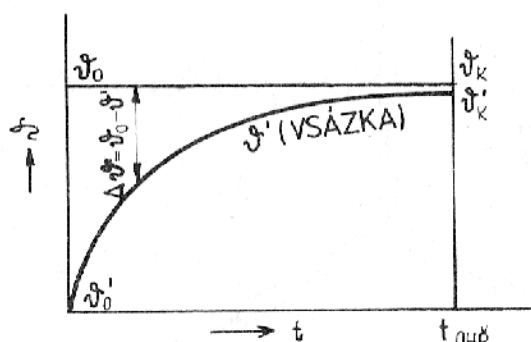
$$t_{\text{ohř}} = \sum_{n=1}^{n=k} t_n,$$

kde  $k$  je požadované číslo posledního intervalu.

#### 4.3.2 Přibližný rychlý způsob výpočtu doby ohřevu tenké vsázky

Výpočet doby ohřevu se značně usnadní, jestliže budeme předpokládat (obr. 24), že:

1. v peci je po celou dobu ohřevu vsázky konstantní teplota ( $Q_0 = Q_k$ ),
2. teplota vsázky stoupá podle paraboly  $t = kQ'^2$ ,
3.  $\alpha$  je konstantní po celou dobu ohřevu (střední hodnota, zahrnující  $\alpha_s$  a  $\alpha_k$ ).



Obr. 24 Ohřev vsázky,  $t = kJ'^2$  [1] (v textu je místo symbolu  $J$  uváděn symbol  $Q$ )

Za těchto předpokladů rovnice (14) dostane tvar

$$\alpha A(Q_0 - Q')dt = m c_s dQ'. \quad (20)$$

Teplotní rozdíl  $\Delta Q = Q_0 - Q'$  se v průběhu ohřevu mění, pro přijatý parabolický průběh teploty však můžeme zavést střední hodnotu  $\Delta Q_s$  podle vztahu

$$\Delta Q_s = \frac{1}{3}(Q_0 - Q'_0). \quad [K]$$

Dosazením za  $\Delta Q_s$  do vztahu (20) dostaneme

$$\alpha A \cdot \frac{1}{3}(Q_0 - Q'_0)t_{ohř} = m c_s (Q'_k - Q'_0), \quad (21)$$

kde

$$Q_k \approx Q'_k.$$

Doba ohřevu  $t_{ohř}$  pak bude z rovnice (21)

$$t_{ohř} = \frac{3m c_s (Q'_k - Q'_0)}{\alpha A (Q_0 - Q'_0)}. \quad [s] \quad (22)$$

Z uvedených způsobů stanovení doby ohřevu tepelně tenké vsázky je přesnější způsob první, je však pracnější. Druhý přibližný způsob je rychlejší, ale méně přesný. Ve všech výpočtech musíme počítat s absorpční plochou  $A$ , kterou obvykle není jednoduché správně stanovit. Známe-li nyní dobu ohřevu vsázky  $t_{ohř}$ , určíme ze vztahů (7) a (5) nebo (6) užitečný příkon  $P_u$  a podle (8) vypočteme příkon pece  $P_p$ .

## 4.4 Výpočet topných článků

Odporové pece zatěžují síť při výhodném účinníku  $\cos j = 1$ . Jedná-li se o větší jednotky (od desítek kW výše), dělají se odporové pece zpravidla trojfázové. Vypočtený příkon se tedy dělí třemi, čímž dostaneme zatížení každé fáze. Příkon každé fáze se rozdělí na menší části (např. po 5 kW až 10 kW), které se spotřebují v jednotlivých topných člancích. Z důvodu snadné vyměnitelnosti se obvykle dělají všechny topné články téže pece stejně velké a z téhož materiálu.

Vhodný materiál na topné články vybíráme podle požadované teploty v peci. Správně volený materiál vydrží zpravidla více než 10000 pracovních hodin. V odporových pecích se obvykle nepoužívají dráty slabší než o průměru 2 mm.

Topný článek jakožto nejteplejší část v peci se musí chladit tak, aby se nepřehřál. Z jednotkového povrchu článku se odvede při daném přípustném oteplení článku nad teplotu pece jen zcela určitý výkon  $p$ , což je poměr příkonu, zavedeného do jednoho topného článku, a povrchu článku. Vyjadřuje se v jednotkách  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Tento výkon se nazývá dovolené povrchové zatížení topného článku. Na povrchovém zatížení závisí teplotní spád mezi topným článkem a ohříváním materiálem. Je zřejmé, že výhodný bude článek s velkým povrchem a relativně malým průřezem.

Výpočtem topných článků rozumíme:

1. výpočet průměru  $d$  topného drátu nebo příčných rozměrů  $a$ ,  $b$  topného pásu,
2. výpočet délky  $l$  topného drátu (pásu),
3. případně výpočet hmotnosti  $m$  topného drátu (pásu).

Pro výpočet topných článků jsou zpravidla zadány tyto parametry:

1. dovolené povrchové zatížení  $p$  topného článku,
2. příkon  $P$  topného článku,
3. napětí  $U$  článku,
4. rezistivitu  $\rho$  materiálu článku při pracovní teplotě,
5. průřez  $S$  topného článku (kruhový nebo obdélníkový).

Výpočet rozměrů topných článků vychází ze stanoveného příkonu na článek. Vyjádříme příkon článku dovoleným povrchovým zatížením a povrchem článku

$$P = O l p, \quad [\text{W}] \quad (23)$$

kde  $O$  je obvod topného vodiče,  
 $l$  délka topného vodiče.

Příkon  $P$  se dá vyjádřit napětím a odporem  $R$  článku

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{S U^2}{r l}. \quad [\text{W}] \quad (24)$$

Ze vztahů (23) a (24) vyplývá pro délku článku

$$l = \frac{S U^2}{r P} = \frac{P}{O p} \quad [\text{m}] \quad (25)$$

a odsud

$$OS = \frac{r P^2}{p U^2} . \quad (26)$$

#### 4.4.1 Článek kruhového průřezu – topný drát

Z rovnic (25) a (26) po dosazení vztahů pro obvod  $O = \pi d$  a průřez  $S = \frac{1}{4} \pi d^2$  vyplývá průměr drátu

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 P^2 r}{\pi^2 p U^2}} , \quad [\text{m}] \quad (27)$$

délka drátu

$$l = \frac{P}{p d p} , \quad [\text{m}] \quad (28)$$

eventuálně hmotnost drátu

$$m_m = \frac{r_m P d}{4 p} , \quad [\text{kg}] \quad (29)$$

kde  $\rho_m$  je hustota materiálu, ze kterého je topný drát vyroben.

Vypočítaný průměr drátu se zaokrouhluje vždy k nejbližší vyšší hodnotě podle řady normalizovaných průměrů drátů.

#### 4.4.2 Článek obdélníkového průřezu – topný pás

U obdélníkového průřezu se stranami  $a$ ,  $b$ , kde  $m = b/a$  ( $m$  je štíhlostní poměr,  $m > 1$ ), platí pro obvod pásu  $O = 2(a + b) = 2a(m + 1)$  a pro průřez  $S = ab = ma^2$ . Po dosazení do rovnic (25) a (26) dostaneme po úpravě tloušťku pásu

$$a = \sqrt[3]{\frac{r P^2}{2m(m+1)p U^2}} . \quad [\text{m}] \quad (30)$$

Šířka pásu je pak

$$b = ma , \quad [\text{m}] \quad (31)$$

délka pásu

$$l = \frac{P}{2(a+b)p}, \quad [\text{m}] \quad (32)$$

případně hmotnost pásu

$$m_m = \frac{r_m P a b}{2(a+b)p}, \quad [\text{kg}] \quad (33)$$

kde  $\rho_m$  je hustota materiálu, ze kterého je topný pás vyroben.

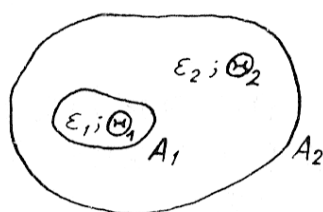
## 4.5 Povrchové zatížení topných vodičů

Topné vodiče (člásky) předávají teplo do pece hlavně sáláním, ale i prouděním pecní atmosféry, příp. vedením do keramických podložek, na nichž spočívají. Budeme uvažovat situaci, že topný článek předává teplo jen sáláním a prouděním, což je nejčastější případ.

### 4.5.1 Povrchové zatížení při sálání

Budou-li na sebe sálat dvě plochy, z nichž větší plocha  $A_2$  zcela prostorově obklopuje menší plochu  $A_1$  (viz obr. 25), platí pro výsledný vysálaný výkon (z plochy  $A_1$  na plochu  $A_2$ ) vztah

$$P = \frac{A_1 s_{\epsilon} (Q_1^4 - Q_2^4)}{\frac{1}{e_1} + \frac{A_1}{A_2} \left( \frac{1}{e_2} - 1 \right)}. \quad [\text{W}] \quad (34)$$



Obr. 25 Sálání dvou obklopujících se ploch – rovnice (34) [1]

Mějme rovný topný vodič volně umístěný v peci, který vyzařuje teplo na všechny strany. Podle rovnice (34) platí, že

$$P_s = \frac{A_{\text{cl}} s_{\epsilon} (Q_{\text{cl}}^4 - Q^4)}{\frac{1}{e_{\text{cl}}} + \frac{A_{\text{cl}}}{A} \left( \frac{1}{e} - 1 \right)}, \quad [\text{W}] \quad (35)$$

kde  $A_{\text{el}}$  je povrch topného článku,  
 $A$  vnitřní povrch pece,  
 $e_{\text{el}}$  stupeň černosti topného článku ( $\approx 0,9$ ),  
 $e$  stupeň černosti vnitřku pece,  
 $Q_{\text{el}}$  povrchová teplota topného článku,  
 $Q$  teplota vnitřku pece.

Druhý člen ve jmenovateli rovnice (35) můžeme proti členu prvnímu zanedbat, neboť platí, že  $A \gg A_{\text{el}}$  a kromě toho  $e = 0,8$  až  $0,9$ . Pak dostaneme

$$P_s = e_{\text{el}} A_{\text{el}} s_{\text{e}} (Q_{\text{el}}^4 - Q^4). \quad [\text{W}] \quad (36)$$

Po vydělení této rovnice povrchem  $A_{\text{el}}$  dostaneme povrchové zatížení topného článku sáláním

$$p'_s = e_{\text{el}} s_{\text{e}} (Q_{\text{el}}^4 - Q^4). \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (37)$$

V odporových pecích však není možné zabezpečit ideální podmínky pro sálání mezi článkem a vsázkou. Články nemohou sálat v peci volně, na sálající článek současně dopadá sálavý tok sousedních článků a odražený sálavý tok od vyzdívky pece atd. Proto je skutečné povrchové zatížení povrchu článků nižší, což vyjádříme součinitelem  $y$  ( $y < 1$ )

$$p_s = y p'_s. \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (38)$$

Správná hodnota  $y$  se odhaduje podle zkušeností a měření v praxi. Pro orientaci můžeme uvést, že u spirál uložených ve žlábcích na boku pece je  $y \approx 0,75$ , u spirál vložených do drážek je  $y \approx 0,45$ . Rozhodneme-li se z opatrnosti pro menší hodnotu  $y$ , prodloužíme tím délku topného článku, avšak současně prodloužíme jeho životnost.

#### 4.5.2 Povrchové zatížení při proudění

Podobně jako u přestupu tepla prouděním do vsázky jsme uvažovali  $\alpha \approx 15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , je i zde možné brát stejný součinitel odvodu tepla prouděním při přirozeném proudění atmosféry v peci, takže povrchové zatížení topného článku prouděním je

$$p_p = 15(Q_{\text{el}} - Q). \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (39)$$

Při nuceném proudění bývá  $\alpha$  několikanásobně větší.

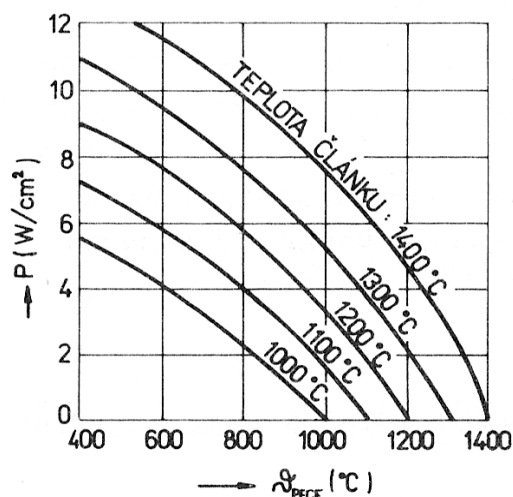
#### 4.5.3 Výsledné povrchové zatížení

Výsledné dovolené povrchové zatížení topného vodiče bude tedy

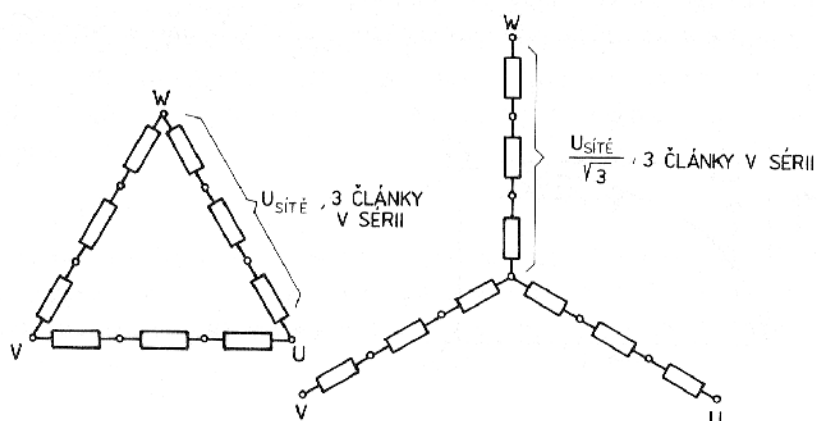
$$p = p_s + p_p = y e_{\text{el}} s_{\text{e}} (Q_{\text{el}}^4 - Q^4) + 15(Q_{\text{el}} - Q). \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (40)$$

Povrchové zatížení  $p$  vychází řádově v jednotkách  $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$  neboli v desítkách  $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ .

Při návrhu topných článků se při volbě povrchového zatížení obvykle vychází z tabulek nebo z diagramů, které dodává výrobce topného materiálu. Tyto údaje vznikají na základě měření na konkrétních hotových pecích za přesně známých podmínek (např. oběh atmosféry, vsázka apod.) a používají se pro výpočty nových pecí podobných konstrukcí i provozních poměrů. Příklad takového diagramu je na obr. 26.



Obr. 26 Povrchové zatížení topných článků [1]



Obr. 27 Zapojení skupin topných článků [1]

## 4.6 Rozdělení příkonu pece na topné články

Při rozdělení celkového příkonu pece  $P_p$  na jednotlivé topné články je nutné respektovat zásady týkající se rovnoměrnosti rozložení teploty, což u pecí se stabilní vsázkou obvykle nepůsobí potíže. Větší pece jsou zpravidla trojfázové, proto se celkový příkon rozdělí na díly, jejichž počet je dělitelný třemi (z důvodů rovnoměrného zatížení trojfázové sítě). Topné články v peci jsou zpravidla stejné a jejich počet je také dělitelný třemi. Jednotlivé topné

články se většinou zapojují do série, přičemž skupiny článků mohou být zapojeny na trojfázovou síť do hvězdy nebo do trojúhelníku (obr. 27). Takové trojfázové skupiny článků se potom na síť připojují paralelně. Tyto skupiny lze často prostřednictvím stykačů umístěných vně pece přepínat buď do trojúhelníka, nebo do hvězdy. Regulace teploty se potom uskutečňuje přepínáním příkonu trojúhelník-hvězda a nikoliv vypnuto-zapnuto apod. Při zapojení do hvězdy je příkon samozřejmě třetinový v porovnání s příkonem při zapojení do trojúhelníka (napětí je  $\sqrt{3}$  krát nižší).

## 5 Návrh kelímkové pece

### 5.1 Přehled vztahů pro výpočet kelímkové pece

#### 5.1.1 Výpočet užitečného tepla a příkonu pece

Užitečné teplo je energie, která musí být dodána danému materiálu, aby se tento dostal do určitého stupně přehřátí. Jde o celkové teplo dodané materiálu během tavy, tedy

$$Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad [\text{J}] \quad (41)$$

kde  $Q_1$  je teplo potřebné pro ohřev z počáteční teploty  $Q_0$  na teplotu tavení  $Q_1$ ,  
 $Q_2$  skupenské teplo daného množství taveného kovu,  
 $Q_3$  teplo potřebné pro přehřátí taveniny z teploty tavení  $Q_1$  na teplotu  $Q_2$ .

Platí

$$Q_1 = m c (Q_1 - Q_0), \quad [\text{J}] \quad (42)$$

$$Q_2 = m c_{sk}, \quad [\text{J}] \quad (43)$$

$$Q_3 = m c (Q_2 - Q_1), \quad [\text{J}] \quad (44)$$

kde  $m$  je hmotnost taveného kovu,  
 $c$  měrná tepelná kapacita taveného kovu,  
 $c_{sk}$  měrné skupenské teplo taveného kovu.

Pro užitečné teplo  $Q_t$  tedy můžeme po dosazení rovnic (42), (43) a (44) do (41) psát

$$Q_t = m c (Q_1 - Q_0) + m c_{sk} + m c (Q_2 - Q_1) = m c (Q_2 - Q_0) + m c_{sk}. \quad [\text{J}] \quad (45)$$

K takto vypočítanému užitečnému teplu přičteme teplo  $Q_{komp}$  na kompenzaci ztrát stěnami, víkem a dnem kelímku, které volíme z intervalu 15 % až 25 % tepla potřebného k tavení. Pro výsledné užitečné teplo tedy platí

$$Q_u = Q_t + Q_{komp}. \quad [\text{J}] \quad (46)$$

Příkon pece potřebný k ohřátí vsázky z počáteční teploty  $Q_0$  na konečnou teplotu  $Q_2$  za celkovou dobu tavení  $t_{tav}$  určíme ze vztahu

$$P_u = \frac{Q_u}{t_{tav}}; \quad [\text{W}] \quad (47)$$

počítáme-li s výkonovou rezervou 8 %, pak celkový příkon je

$$P = 1,08 \cdot P_u. \quad [\text{W}] \quad (48)$$

### 5.1.2 Určení přestupové plochy

Užitečná plocha je plocha kelímku, přes kterou probíhá přestup tepla do taveného materiálu. Při výpočtu vyjdeme z užitečného objemu, což je objem vsázky, který vyjádříme z hustoty materiálu a hmotnosti vsázky. Ve výpočtu je zahrnuto navýšení objemu o 40 % z důvodu nekompaktnosti taveného materiálu před tavením (kompenzace vzduchových mezer mezi granulemi kovu) a jeho teplotní roztažnosti. Toto navýšení nazýváme součinitel plnění. Pro užitečný objem platí

$$V_u = 1,4 \frac{m}{\rho}, \quad [\text{m}^3] \quad (49)$$

kde  $\rho$  je hustota materiálu určeného k tavení.

Výšku vsázky  $h_v$  určíme z vypočteného užitečného objemu a průměru kelímku. Platí

$$h_v = \frac{4V_u}{\pi d_{sk}^2}, \quad [\text{m}] \quad (50)$$

kde  $d_{sk}$  je střední průměr kelímku.

Přestupová plocha kelímku je pak

$$S_p = h_v [\pi (d_{sk} + 2s_k)], \quad [\text{m}^2] \quad (51)$$

kde  $s_k$  je tloušťka stěny kelímku.

### 5.1.3 Výpočet teplotního spádu ve stěně kelímku a teploty jeho vnější stěny

Teplu se šíří ve směru teplotního spádu a jeho množství připadající na jednotku plochy a jednotku času je hustota tepelného toku. Pro přenos tepla vedením (kondukcí) rovinnou stěnou platí následující matematický zápis:

$$Q = S_p \frac{1}{R} \Delta Q t = S_p \frac{l}{s_s} \Delta Q t, \quad [\text{J}] \quad (52)$$

kde  $l$  je tepelná vodivost materiálu stěny,  
 $s_s$  tloušťka stěny,  
 $R$  tepelný odpor stěny,  
 $\Delta Q$  teplotní spád ve stěně,  
 $t$  doba průchodu tepla stěnou.

Pro válcovou stěnu kelímku platí vztah

$$Q_u = \frac{2\pi h_v}{R_k} \Delta Q_k t_{\text{tav}}, \quad [\text{J}] \quad (53)$$

kde  $R_k$  je tepelný odpor stěny kelímku,  
 $\Delta Q_k$  teplotní spád ve stěně kelímku.

Tepelný odpor válcové stěny kelímku vypočítáme podle vztahu

$$R_k = \frac{1}{l_k} \ln \frac{d_{sk} + 2s_k}{d_{sk}}. \quad [\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}] \quad (54)$$

Ze vztahu (53) vyjádříme tepelný spád ve stěně kelímku

$$\Delta Q_k = \frac{Q_u R_k}{2\pi h_v t_{\text{tav}}} \quad [\text{K}] \quad (55)$$

a vypočítáme potřebnou teplotu jeho vnější stěny, tedy

$$Q_k = Q_2 + \Delta Q_k. \quad [\text{K}] \quad (56)$$

#### 5.1.4 Provozní teplota odporových spirál a průměr drátu spirál

Předpokládejme, že teplo odevzdané topnými spirálami stěně kelímku se bude sdílet převážně radiací. Pro vyzářené teplo platí

$$Q_r = Q_u = c_s (Q_{sp}^4 - Q_k^4) S_p t_{\text{tav}}, \quad [\text{J}] \quad (57)$$

přičemž celkový součinitel sálání je

$$c_s = \frac{1}{\frac{1}{c_{sp}} + \frac{1}{c_k} - \frac{1}{c_b}}, \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}] \quad (58)$$

kde  $Q_{sp}$  je teplota topné spirály,  
 $Q_k$  teplota vnější stěny kelímku,  
 $c_{sp}$  součinitel sálání spirály,  
 $c_k$  součinitel sálání kelímku,  
 $c_b$  součinitel sálání absolutně černého tělesa.

Z rovnice (56) nyní vyjádříme potřebnou teplotu topných spirál, tedy

$$Q_{sp} = \sqrt[4]{\frac{Q_u}{c_s S_p t_{\text{tav}}} + Q_k^4}. \quad [\text{K}] \quad (59)$$

Podle teploty topných spirál vybereme z tabulek vhodný materiál a odhadneme průměr drátu. K němu nalezneme v tabulce povrchové zatížení. Nyní můžeme přikročit k návrhu vodiče topné spirály. Pro výpočet průměru drátu použijeme vztah

$$d = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi^2} \left( \frac{P_c}{3U} \right)^2 \frac{r_Q}{p_z}}, \quad [\text{m}] \quad (60)$$

kde  $P_c$  je celkový potřebný výkon,  
 $U$  sdružené napájecí napětí,  
 $\rho_Q$  rezistivita při provozní teplotě spirály,

$p_z$  povrchové zatížení vodiče spirály.

Průměr drátu poté volíme nejbližší vyšší vypočtenému průměru, dle tabulek.

### 5.1.5 Jednotkové tepelné ztráty

Jednotkové ztráty jsou ztráty vyjádřené na jednotku plochy, které jsou tudíž použitelné pro výpočet tepelných ztrát jakékoliv velikosti plochy se stejným tepelným odporem. Tepelný odpor vypočítáme (pro materiály řazené ve směru tepelného toku) jako součet podílů tloušťky jednotlivých materiálů a jejich tepelné vodivosti. Směr tepelného toku je dán teplotou spirály a teplotou vnějšího pláště kelímkové pece,

$$\Delta Q_c = Q_{sp} - Q_{pl}, \quad [K] \quad (61)$$

kde  $Q_{pl}$  je zvolená teplota pláště pece.

Pro celkový tepelný odpor platí

$$R_c = \sum_i \frac{s_i}{l_i}, \quad [K \cdot m^2 \cdot W^{-1}] \quad (62)$$

kde  $s_i$  je tloušťka jednotlivých materiálů,  
 $l_i$  tepelná vodivost jednotlivých materiálů.

Jednotkové tepelné ztráty potom jsou

$$P_{zj} = \frac{\Delta Q_c}{R_c}. \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (63)$$

### 5.1.6 Celkové tepelné ztráty a výkon pece

V následujícím kroku vypočítáme přestupovou plochu pro určení celkových tepelných ztrát. Přestupová plocha se určí z válcového tvaru pece, který je navíc zkosený. Tepelný tok nebude tedy rovnoměrný. Proto vypočítáme vnitřní a vnější přestupovou plochu a z nich vypočítáme geometrický průměr, který budeme považovat za ekvivalentní pro výpočet.

Vnitřní plocha přestupu (prochází středem topných spirál) je

$$S_2 = h_v \pi (d_{sk} + 2s_k + 2s_\Delta), \quad [m^2] \quad (64)$$

kde  $s_\Delta$  je vzdálenost vnější stěny kelímku od středu topné spirály.

Vnější plocha přestupu (prochází vnějším obvodem pláště pece) je

$$S_1 = h_v \pi d_{pl}, \quad [m^2] \quad (65)$$

kde  $d_{pl}$  je vnější průměr pece.

Výpočtová plocha přestupu pak bude

$$S_{vp} = \sqrt{S_1 S_2}. \quad [m^2] \quad (66)$$

Nyní vypočítáme celkové tepelné ztráty dané určenou přestupovou plochou a jednotkovými ztrátami. Musíme ovšem vědět o chybě, kterou v sobě přináší vypočítaná přestupová plocha. Tepelný tok, který se šíří ve vertikálním směru, bude v určitých částech pece procházet větší šíří materiálu s větším celkovým tepelným odporem. Ve vypočítaném ztrátovém výkonu s tímto nebudeme počítat, tedy celkový ztrátový výkon bude větší než vyplývá z předcházející úvahy (jinými slovy: tepelný ztrátový tok dnem a víkem kelímkové pece při výpočtu zanedbáváme).

Pro celkové tepelné ztráty platí

$$P_{zc} = S_{vp} P_{zj} . \quad [W] \quad (67)$$

Potom celkový příkon pece vypočítáme z výkonu užitečného (tavba materiálu), tepelných ztrát a přídatných ztrát (10 % z tepelných ztrát), tedy celkový příkon je

$$P_c = P_u + 1,1P_{zc} . \quad [W] \quad (68)$$

### 5.1.7 Výpočet délky vodičů a návrh spirál

Při výpočtu potřebné délky vodiče spirály na jednu fázi z drátu o výše vypočteném průměru  $d$  pro požadovaný výkon se vyjde ze vztahu pro příkon a elektrický odpor vodiče, tedy

$$R = r_Q \frac{4L_{1f}}{\pi d^2} \quad [\Omega] \quad (69)$$

a

$$P_c = 3 \frac{U^2}{R} . \quad [W] \quad (70)$$

Ze vztahu (69) si vyjádříme odpor  $R$ , oba vztahy porovnáme a z rovnice vyjádříme potřebnou délku vodiče

$$L_{1f} = \frac{3\pi U^2 d^2}{4 r_Q P_c} . \quad [m] \quad (71)$$

Navržený vodič je třeba zkontrolovat na povrchové zatížení, tedy

$$p_{zk} = \frac{P_c}{3\pi d L_{1f}} . \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (72)$$

Dále provedeme návrh spirály kelímkové pece. Nejdříve vypočítáme délku jednoho závitu kolem spirály uložené v nosníkovém žlabu. Délka jednoho závitu spirály při stoupání s je

$$L_{1z} = \sqrt{s^2 + [\pi(D-d)]^2} . \quad [m] \quad (73)$$

Vnější průměr spirály pro dráty s průměrem větším než 1 mm se volí  $D = (5 \text{ až } 7) \times d$ . Keramické nosníky se vyrábí v určité řadě, proto průměr  $D$  je dán vybraným typem. Stoupání závitu si musíme v tomto kroku zvolit a to tak, že  $s \geq (2 \text{ až } 2,5) \times d$ . Takto zvolené stoupání zaručí dobré rozložení výkonu v ose kelímku a také, že jednotlivé závity budou od sebe dostatečně vzdáleny.

Dále vypočítáme délku jedné otáčky nosníkového žlabu (kolem kelímku). Podělením této délky stoupáním závitu dostaneme počet závitů na jeden žlab. Celkovou délku drátu připadající na jednu otáčku nosníkového žlabu vypočítáme vynásobením počtu závitů na jeden žlab a délky jednoho závitu spirály. Počet žlabů pece připadající na jednu fázi dostaneme podělením celkové délky spirály délkou spirály na jeden žlab. Z hlediska konstrukce pece budeme pochopitelně uvažovat celočíselný počet žlabů na jednu fázi i celkem. Proto s ohledem na rozměry pece celková výška nosníků musí korespondovat s navrženou výškou kelímkové pece (výška celého topného systému by měla být přibližně stejná jako výška kelímku), v opačném případě musíme změnit výšku pece (kelímku) a výpočet provést znovu. Pro upravený počet nosníků přepočítáme vinutí spirály a určit nové hodnoty parametrů.

Zadané parametry pro takto upravený výpočet budou celková délka vodiče na jednu fázi  $L_{1f}$ , délka jednoho žlabu po obvodu kelímku  $L_{zl}$ , průměr spirály  $D$  a průměr vodiče  $d$ , které zůstanou shodné, a volený počet žlabů na jednu fázi  $n_{zl}$ , naopak výsledkem bude nové stoupání závitů:

$$s = \frac{\pi(D-d)}{\sqrt{\left(\frac{L_{1f}}{n_{zl} L_{zl}}\right)^2 - 1}}. \quad [\text{m}] \quad (74)$$

Nyní podrobíme vypočítané nebo zadané parametry kontrole. Nutnou podmínkou pro stoupání závitu spirál je, že musí být větší než průměr vodiče spirál, a to ve vhodném poměru, jak je uvedeno výše, tzn.  $s \geq (2 \text{ až } 2,5) \times d$ .

Dále přepočítáme počet závitů na jeden žlab a délku vodiče na jeden žlab.

### 5.1.8 Teploty na rozhraních a střední teploty

Při výpočtu teplotního spádu v materiálech a teplot na rozhraních vyjdeme z celkového teplotního spádu, celkového tepelného odporu (s připočtením konvekce mezi pláštěm pece a okolím) a parciálních tepelných odporů jednotlivých materiálů stěny kelímkové pece.

Pro celkový tepelný odpor platí

$$R_c = \frac{s_1}{l_1} + \frac{s_2}{l_2} + \frac{s_3}{l_3} + \frac{1}{\alpha_p}, \quad [\text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}] \quad (75)$$

kde  $\alpha_p$  je součinitel konvekce mezi pláštěm a okolním vzduchem.

Teplotní úbytky v jednotlivých vrstvách pece jsou dány vztahem

$$\Delta Q_i = \Delta Q_c \frac{\frac{s_i}{l_i}}{R_c}. \quad [\text{K}] \quad (76)$$

Pro střední teploty v jednotlivých vrstvách platí

$$Q_{\text{stř},i} = \frac{Q_i + Q_{i-1}}{2}. \quad [\text{K}] \quad (77)$$

Z krajních teplot (teplota topných spirál, teplota okolí) a z teplotních spádů na jednotlivých vrstvách dále vypočítáme teploty na jednotlivých rozhraních.

### 5.1.9 Akumulované teplo kelímkové pece

Pro výpočet akumulovaného tepla v jednotlivých vrstvách kelímkové pece musíme určit střední teploty z teplot na rozhraních. Pro střední teplotu dna o více vrstvách použijeme přibližný vztah

$$Q_{\text{stř},d} = \frac{Q_{\text{sp}} + Q_{\text{pl}}}{2}, \quad [\text{K}] \quad (78)$$

stejně tak pro střední teplotu víka

$$Q_{\text{stř},v} = \frac{Q_2 + Q_{\text{pl}}}{2}. \quad [\text{K}] \quad (79)$$

Akumulované teplo vypočítáme jako součin následujících veličin: hmotnosti, měrné tepelné kapacity a rozdílu střední teploty daného materiálu a vztažné teploty prostředí. Hustoty použitých materiálů jsou známy, vypočítáme tedy s využitím elementární geometrie jednotlivé objemy.

Akumulované teplo v jednotlivých částech pece vypočítáme dle vztahu

$$Q_{\text{ak},i} = V_i r_i c_i (Q_{\text{stř},i} - Q_{\text{okolí}}), \quad [\text{J}] \quad (80)$$

celkové akumulované teplo pak

$$Q_{\text{ak}} = \sum_i Q_{\text{ak},i}. \quad [\text{J}] \quad (81)$$

### 5.1.10 Doba tavení

Dobu práce kelímkové pece vypočítáme jako součet doby potřebné k vyhřátí pece bez vsázky (doba náběhu) a doby tavení materiálu.

Pro dobu náběhu platí

$$t_n = \frac{Q_{ak}}{3600(P_c - 1,1P_{zc})}, \quad [h] \quad (82)$$

dobu tavení vypočteme podle vztahu

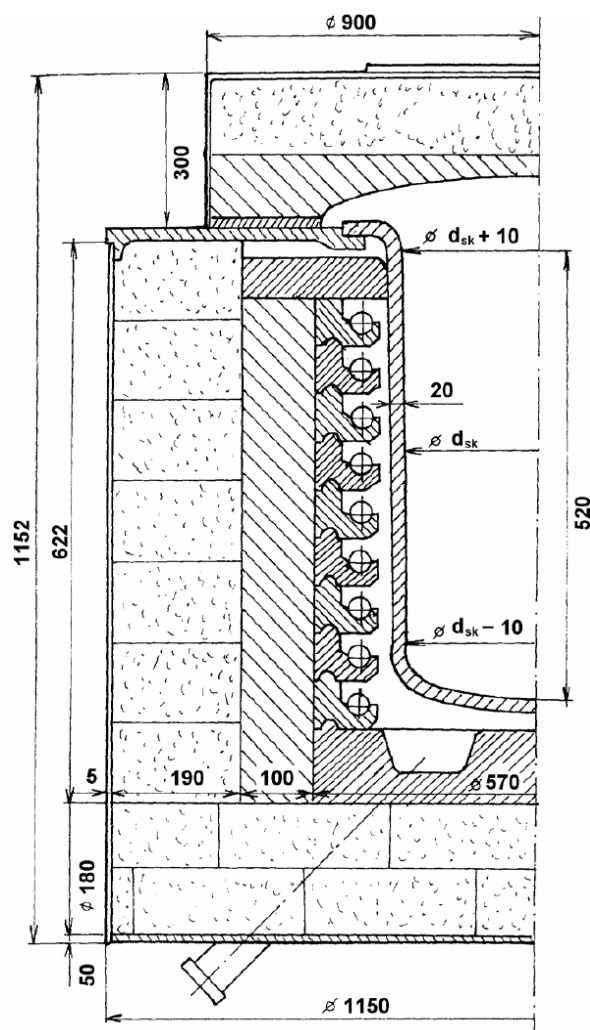
$$t_{tav} = \frac{Q_u}{3600(P_c - 1,1P_{zc})}. \quad [h] \quad (83)$$

Celková doba je pak

$$t_c = t_n + t_{tav}. \quad [h] \quad (84)$$

## 5.2 Výpočet návrhu kelímkové pece

V této části provedeme návrh kelímkové pece na tavení hliníku, známe-li rozměry a tvar pece, střední průměr kelímku, počáteční teplotu, teplotu přehřátí a hmotnost vsázky granulovaného hliníku.

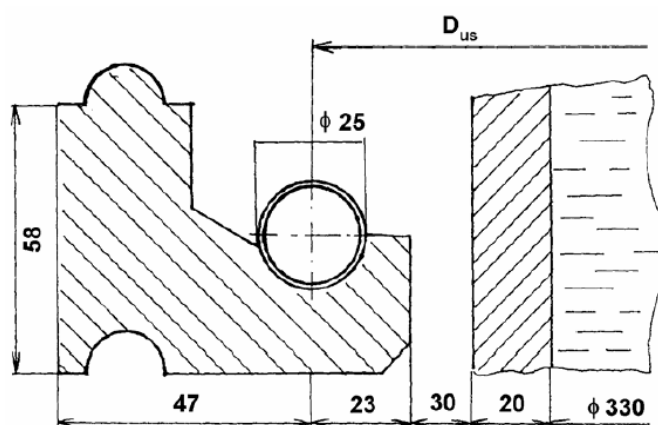


Obr. 28 Průřez kelímkové pece [6]

## Zadání

Navrhněte kelímkovou pec pro tavení 100 kg hliníku, je-li požadováno, aby se hliník roztavil a přehřál na teplotu 725 °C za 1 hodinu po vložení granulované vsázky do pece. Střední vnitřní průměr kelímku je 0,33 m. Pec je napájena ze sítě 3×230/400 V, spirály pece jsou zapojeny do trojúhelníka.

Odporový drát je navinut do spirál, které jsou umístěné na keramických nosnících. Úkolem je určit průměr drátu, celkovou délku drátu a délku drátu na jednu fázi, stoupání závitů spirály a průměr vinutí spirály.



Obr. 29 Průřez keramického nosníku [6]

## Výpočet užitečného tepla a příkonu pece

Hmotnost vsázky:

$$m = 100 \text{ kg}$$

Hustota hliníku:

$$\rho_{\text{Al}} = 2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Počáteční teplota vsázky:

$$J_0 = 20 \text{ °C}$$

Teplota přehřátí vsázky:

$$J_2 = 725 \text{ °C}$$

Doba ohřevu vsázky:

$$t_{\text{tav}} = 1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$$

Měrná tepelná kapacita hliníku:

$$c_{\text{Al}} = 896 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Měrné skupenské teplo hliníku:

$$c_{\text{sk}} = 396 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Teplu dodané hliníku během tavby:

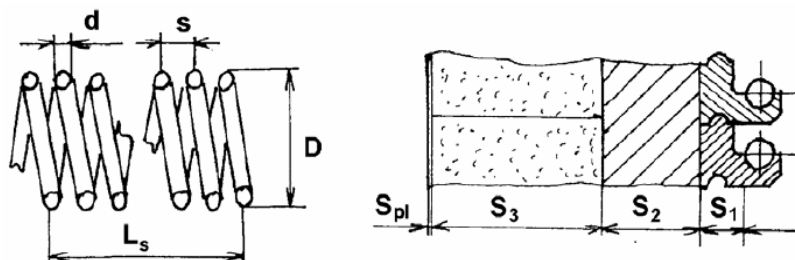
$$Q_i = m c_{\text{Al}} (J_2 - J_0) + m c_{\text{sk}} =$$

$$= 100 \text{ kg} \cdot 896 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot (725 \text{ °C} - 20 \text{ °C}) + 100 \text{ kg} \cdot 396 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} =$$

$$= 102,768 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Celkové užitečné teplo (včetně přídavného tepla  $Q_{komp}$ , které činí 20 % tepla na tavení):

$$Q_u = Q_t + Q_{komp} = 1,2 Q_t = 1,2 \cdot 102,768 \cdot 10^6 \text{ J} = \underline{123,322 \cdot 10^6 \text{ J}}$$



Obr. 30 Vinutí spirály topného drátu a vnější přestupná plocha pro výpočet ztrát [6]

Příkon pece:

$$P = \frac{Q_u}{t_{tav}} = \frac{123,322 \cdot 10^6 \text{ J}}{3600 \text{ s}} = \underline{34,256 \cdot 10^3 \text{ W}}$$

Celkový příkon pece (včetně výkonové rezervy, která činí 8 % vypočítaného příkonu):

$$P_u = 1,08 P = 1,08 \cdot 34,256 \cdot 10^3 \text{ W} = \underline{36,996 \cdot 10^3 \text{ W}}$$

### Určení přestupové plochy

Střední průměr kelímku:

$$d_{sk} = 0,33 \text{ m}$$

Tloušťka stěny kelímku:

$$s_k = 0,02 \text{ m}$$

Objem vsázky (započítán součinitel plnění 40 %):

$$V_u = \frac{1,4 \text{ m}}{r_{Al}} = \frac{1,4 \cdot 100 \text{ kg}}{2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} = \underline{51,852 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}$$

Výška vsázky:

$$h_v = \frac{4V_u}{\pi d_{sk}^2} = \frac{4 \cdot 51,852 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{\pi \cdot (0,33 \text{ m})^2} = \underline{0,606 \text{ m}}$$

Počet keramických nosníků (s ohledem na výšku keramického segmentu  $h_s = 0,058 \text{ m}$ ):

$$n_{kn} = \frac{h_v}{h_s} = \frac{0,606 \text{ m}}{0,058 \text{ m}} \approx 11 \text{ (po zaokrouhlení nahoru)}$$

Předběžná výška kelímku:

$$h_k = n_{kn} h_s = 11 \cdot 0,058 \text{ m} = \underline{0,638 \text{ m}}$$

Přestupová plocha kelímku:

$$S_p = h_v [\pi (d_{sk} + 2s_k)] = 0,606 \text{ m} \cdot [\pi (0,33 \text{ m} + 2 \cdot 0,02 \text{ m})] = \underline{0,704 \text{ m}^2}$$

**Výpočet teplotního spádu ve stěně kelímku a teploty jeho vnější stěny**

Tepelná vodivost materiálu kelímku:

$$l_k = 46,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Tepelný odpor stěny kelímku:

$$R_k = \frac{1}{l_k} \ln \frac{d_{sk} + 2s_k}{d_{sk}} = \frac{1}{46,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}} \ln \frac{0,33 \text{ m} + 2 \cdot 0,02 \text{ m}}{0,33 \text{ m}} = \underline{2,466 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}}$$

Teplotní spád ve stěně kelímku:

$$\Delta J_k = \frac{Q_u R_k}{2 \pi h_v t_{\text{tav}}} = \frac{123,322 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot 2,466 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}}{2 \pi \cdot 0,606 \text{ m} \cdot 3600 \text{ s}} = \underline{22,19^\circ \text{C}}$$

Teplota vnější stěny kelímku:

$$J_k = J_2 + \Delta J_k = 725^\circ \text{C} + 22,19^\circ \text{C} = \underline{747,19^\circ \text{C}}$$

**Provozní teplota odporových spirál a průměr drátu spirál**

Součinitel sálání spirál:

$$c_{\text{spr}} = 3,663 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

Součinitel sálání kelímku:

$$c_k = 5,408 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

Součinitel sálání absolutně černého tělesa:

$$c_b = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

Celkový součinitel sálání:

$$\begin{aligned} c_s &= \frac{1}{\frac{1}{c_{\text{spr}}} + \frac{1}{c_k} - \frac{1}{c_b}} = \\ &= \frac{1}{\frac{1}{3,663 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}} + \frac{1}{5,408 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}} - \frac{1}{5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}}} = \\ &= \underline{3,552 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}} \end{aligned}$$

### Teplota topných spirál:

$$\begin{aligned} J_{sp} &= \sqrt[4]{\frac{Q_u}{c_s S_p t_{tav}} + (J_k + 273,15)^4} - 273,15 = \\ &= \sqrt[4]{\frac{123,322 \cdot 10^6 \text{ J}}{3,552 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \cdot 0,704 \text{ m}^2 \cdot 3600 \text{ s}} + (747,19 + 273,15)^4} - 273,15 = \\ &= \underline{978,43^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

Z tab. 4 vybereme vhodný typ topného elementu, odhadneme průměr drátu a z tab. 5, event. tab. 6 (dle odhadnutého průměru) odečteme odpovídající povrchové zatížení pro vypočtenou pracovní teplotu spirál:

|                                                                                               |                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Materiál:                                                                                     | Kanthal A-1                                           |
| Rezistivita:                                                                                  | $\rho_0 = 1,45 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$   |
| Teplotní součinitel zvětšení rezistivity<br>(pro pracovní teplotu $J = 1000^\circ\text{C}$ ): | $c_J = 1,04$                                          |
| Povrchové zatížení při teplotě $J$ (pro<br>odhadnutý průměr drátu $d' = 1,9 \text{ mm}$ ):    | $p_z = 95,2 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ |
| Provozní napětí:                                                                              | $U = 400 \text{ V}$                                   |

### Rezistivita při provozní teplotě spirály:

$$r_J = c_J r_0 = 1,04 \cdot 1,45 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m} = \underline{1,508 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}}$$

### Průměr drátu:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi^2} \left( \frac{P_u}{3U} \right)^2 \frac{r_J}{p_z}} = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi^2} \left( \frac{36,996 \cdot 10^3 \text{ W}}{3 \cdot 400 \text{ V}} \right)^2 \frac{1,508 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}}{95,2 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}} = \underline{1,827 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

Dle tabulek zvolíme nejbližší vyšší průměr drátu:  $\underline{d = 1,9 \text{ mm}}$ . (Odhad  $d'$  byl správný.)

### **Jednotkové tepelné ztráty pece**

|                                               |                                                                 |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Tepelná vodivost keramického nosníku:         | $l_1 = 1,00 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  |
| Tepelná vodivost žáruvzdorné vyzdívky:        | $l_2 = 0,85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  |
| Tepelná vodivost izolačních tvárníc:          | $l_3 = 0,581 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ |
| Tepelná vodivost ocelového pláště:            | $l_4 = 54,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  |
| Tloušťka keramického nosníku (od spirál ven): | $s_1 = 34,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$                            |
| Tloušťka žáruvzdorné vyzdívky:                | $s_2 = 0,1 \text{ m}$                                           |

|                                         |                                            |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------|
| Tloušťka vyzdívky z izolačních tvárníc: | $s_3 = 0,19 \text{ m}$                     |
| Tloušťka ocelového pláště:              | $s_4 = s_{pl} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ |
| Teplota pláště pece:                    | $J_{pl} = 30 \text{ °C}$                   |

Celkový tepelný odpor pece (od spirál směrem ven):

$$R_c = \sum_i \frac{s_i}{l_i} =$$

$$= \frac{0,0345 \text{ m}}{1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}} + \frac{0,1 \text{ m}}{0,85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}} + \frac{0,19 \text{ m}}{0,581 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}} + \frac{0,005 \text{ m}}{54,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}} =$$

$$= \underline{0,479 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}}$$

Jednotkové tepelné ztráty:

$$P_{zj} = \frac{\Delta J_c}{R_c} = \frac{J_{sp} - J_{pl}}{R_c} = \frac{978,43 \text{ °C} - 30 \text{ °C}}{0,479 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}} = \underline{1980 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}$$

### **Celkové tepelné ztráty a výkon pece**

Vzdálenost vnější stěny kelímku od středu spirály:  $s_\Delta = 0,053 \text{ m}$

Vzdálenost vnější stěny nosníku od středu spirály:  $s_{sn} = 0,047 \text{ m}$

Vnější průměr pece:  $D_{pl} = 1,15 \text{ m}$

Vnitřní plocha přestupu:

$$S_2 = h_v \pi (d_{sk} + 2s_k + 2s_\Delta) = 0,606 \text{ m} \cdot \pi (0,33 \text{ m} + 2 \cdot 0,02 \text{ m} + 2 \cdot 0,053 \text{ m}) = \underline{0,906 \text{ m}^2}$$

Vnější plocha přestupu:

$$S_1 = h_v \pi D_{pl} = 0,606 \text{ m} \cdot \pi \cdot 1,15 \text{ m} = \underline{2,189 \text{ m}^2}$$

Výpočtová plocha přestupu:

$$S_{vp} = \sqrt{S_1 S_2} = \sqrt{2,189 \text{ m}^2 \cdot 0,906 \text{ m}^2} = \underline{1,408 \text{ m}^2}$$

Celkové tepelné ztráty:

$$P_{zc} = S_{vp} P_{zj} = 1,408 \text{ m}^2 \cdot 1980 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} = \underline{2787,84 \text{ W}}$$

Celkový příkon pece (včetně tepelných ztrát a ztrát víkem a dnem pece, které činí odhadem 10 % z celkových tepelných ztrát):

$$P_c = P_u + 1,1P_{zc} = 34256 \text{ W} + 1,1 \cdot 2787,84 \text{ W} = \underline{37,323 \cdot 10^3 \text{ W}}$$

## Výpočet délky vodičů a návrh spirál

Délka vodiče na jednu fázi:

$$L_{1f} = \frac{3\pi U^2 d^2}{4 r_J P_c} = \frac{3\pi \cdot (400 \text{ V})^2 \cdot (0,0019 \text{ m})^2}{4 \cdot 1,508 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m} \cdot 37323 \text{ W}} = \underline{24,18 \text{ m}}$$

Kontrola dovoleného povrchového zatížení:

$$p_{zk} = \frac{P_c}{3\pi d L_{1f}} = \frac{37323 \text{ W}}{3\pi \cdot 0,0019 \text{ m} \cdot 24,18 \text{ m}} = \underline{86,198 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}$$

Skutečné povrchové zatížení je menší než dovolené povrchové zatížení uvedené v tabulce ( $86,186 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} < 95,2 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ), navržený odporový drát tedy vyhovuje.

Volba vnějšího průměru spirály:

$$D = 7d = 7 \cdot 0,0019 \text{ m} = 0,0133 \text{ m}$$

Volba stoupání spirály:

$$s = 2,5d = 2,5 \cdot 0,0019 \text{ m} = 0,00475 \text{ m}$$

Délka jednoho závitu spirály:

$$L_{1z} = \sqrt{s^2 + [\pi(D-d)]^2} = \sqrt{(0,00475 \text{ m})^2 + [\pi(0,0133 \text{ m} - 0,0019 \text{ m})]^2} = \underline{0,03613 \text{ m}}$$

Délka nosníkového žlabu (na jednu otáčku kolem kelímku):

$$L_{zl} = \pi D_{us} = \pi(d_{sk} + 2s_k + 2s_{\Delta}) = \pi(0,33 \text{ m} + 2 \cdot 0,02 \text{ m} + 2 \cdot 0,053 \text{ m}) = \underline{1,495 \text{ m}}$$

Počet závitů na jeden žlab:

$$n_{zz} = \frac{L_{zl}}{s} = \frac{1,495 \text{ m}}{0,00475 \text{ m}} = \underline{315}$$

Délka drátu připadající na jeden žlab:

$$L_{dz} = n_{zz} L_{1z} = 315 \cdot 0,03613 \text{ m} = \underline{11,381 \text{ m}}$$

Počet žlabů pece připadající na jednu fázi:

$$n_{zl} = \frac{L_{1f}}{L_{dz}} = \frac{24,18 \text{ m}}{11,381 \text{ m}} = 2,125 \quad (\text{zaokrouhlíme na celočíselný počet: 3 žlaby})$$

Nové stoupání závitů (s ohledem na počet žlabů):

$$s = \frac{\pi(D-d)}{\sqrt{\left(\frac{L_{1f}}{n_{zl} L_{zl}}\right)^2 - 1}} = \frac{\pi(0,0133 \text{ m} - 0,0019 \text{ m})}{\sqrt{\left(\frac{24,18 \text{ m}}{3 \cdot 1,495 \text{ m}}\right)^2 - 1}} = 6,76 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Přepočet délky jednoho závitu spirály:

$$L_{1z} = \sqrt{s^2 + [\pi(D-d)]^2} = \sqrt{(0,00676 \text{ m})^2 + [\pi(0,0133 \text{ m} - 0,0019 \text{ m})]^2} = 0,0364 \text{ m}$$

Přepočet počtu závitů na jeden žlab:

$$n_{zz} = \frac{L_{zl}}{s} = \frac{1,495 \text{ m}}{0,00676 \text{ m}} = 222$$

Přepočet délky drátu připadající na jeden žlab:

$$L_{dz} = n_{zz} L_{1z} = 222 \cdot 0,0364 \text{ m} = 8,081 \text{ m}$$

## Teploty na rozhraních a střední teploty

Součinitel konvekce mezi pláštěm pece a okolím:  $\alpha_p = 125 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Celkový tepelný odpor:

$$\begin{aligned} R_c &= \frac{s_1}{l_1} + \frac{s_2}{l_2} + \frac{s_3}{l_3} + \frac{1}{a_p} = \\ &= \frac{0,0345 \text{ m}}{1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}} + \frac{0,1 \text{ m}}{0,85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}} + \frac{0,19 \text{ m}}{0,581 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}} + \frac{1}{125 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}} = \\ &= 0,487 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} \end{aligned}$$

Celkový teplotní úbytek:

$$\Delta J_c = J_{sp} - J_{pl} = 978,43^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C} = 948,43^\circ\text{C}$$

Teplotní úbytek v 1. vrstvě (keramické nosníky):

$$\Delta J_1 = \Delta J_c \frac{s_1}{R_c} = 948,43^\circ\text{C} \cdot \frac{0,0345\text{ m}}{0,487\text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}} = \underline{67,19^\circ\text{C}}$$

Teplotní úbytek ve 2. vrstvě (žáruvzdorná vyzdívka):

$$\Delta J_2 = \Delta J_c \frac{s_2}{R_c} = 948,43^\circ\text{C} \cdot \frac{0,1\text{ m}}{0,487\text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}} = \underline{229,12^\circ\text{C}}$$

Teplotní úbytek ve 3. vrstvě (izolační tvárnice):

$$\Delta J_3 = \Delta J_c \frac{s_3}{R_c} = 948,43^\circ\text{C} \cdot \frac{0,19\text{ m}}{0,487\text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}} = \underline{636,87^\circ\text{C}}$$

Střední teplota 1. vrstvy (keramické nosníky):

$$J_{\text{stř},1} = \frac{2J_{\text{sp}} - \Delta J_1}{2} = \frac{2 \cdot 978,43^\circ\text{C} - 67,19^\circ\text{C}}{2} = \underline{944,84^\circ\text{C}}$$

Střední teplota 2. vrstvy (žáruvzdorná vyzdívka):

$$J_{\text{stř},2} = \frac{2(J_{\text{sp}} - \Delta J_1) - \Delta J_2}{2} = \frac{2(978,43^\circ\text{C} - 67,19^\circ\text{C}) - 229,12^\circ\text{C}}{2} = \underline{796,68^\circ\text{C}}$$

Střední teplota 3. vrstvy (izolační tvárnice):

$$J_{\text{stř},3} = \frac{2(J_{\text{sp}} - \Delta J_1 - \Delta J_2) - \Delta J_3}{2} = \frac{2(978,43^\circ\text{C} - 67,19^\circ\text{C} - 229,12^\circ\text{C}) - 636,87^\circ\text{C}}{2} = \underline{363,69^\circ\text{C}}$$

Střední teplota 4. vrstvy (ocelový plášť pece):

$$J_{\text{stř},4} \approx J_{\text{pl}} = \underline{30^\circ\text{C}}$$

Střední teplota stěny kelímku:

$$J_{\text{stř},k} = \frac{J_k + J_2}{2} = \frac{747,19^\circ\text{C} + 725^\circ\text{C}}{2} = \underline{736,1^\circ\text{C}}$$

Střední teplota dna pece:

$$J_{\text{stř,d}} = \frac{J_{\text{sp}} + J_{\text{pl}}}{2} = \frac{978,43^{\circ}\text{C} + 30^{\circ}\text{C}}{2} = \underline{504,215^{\circ}\text{C}}$$

Střední teplota víka pece:

$$J_{\text{stř,v}} = \frac{J_2 + J_{\text{pl}}}{2} = \frac{725^{\circ}\text{C} + 30^{\circ}\text{C}}{2} = \underline{377,5^{\circ}\text{C}}$$

**Akumulované teplo kelímkové pece**

|                                                 |                                         |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Část výšky kelímku od ker. nosníku k víku pece: | $h_p = 0,05 \text{ m}$                  |
| Průměr žlabů (v ose spirály):                   | $D_{\text{us}} = 0,476 \text{ m}$       |
| Tloušťka 1. izolační vrstvy dna:                | $s_{\text{d},1} = 0,05 \text{ m}$       |
| Tloušťka 2. izolační vrstvy dna:                | $s_{\text{d},2} = 0,18 \text{ m}$       |
| Tloušťka 3. izolační vrstvy dna:                | $s_{\text{d},3} = 0,05 \text{ m}'$      |
| Průměr 1. izolační vrstvy dna:                  | $D_{\text{d},1} = 0,57 \text{ m}$       |
| Výška 3. izolační vrstvy pece:                  | $h_3 = 0,622 \text{ m}$                 |
| Průměr víka pece:                               | $D_v = 0,9 \text{ m}$                   |
| Výška víka pece:                                | $s_v = 0,3 \text{ m}$                   |
| Teplota okolí:                                  | $J_{\text{okolí}} = 20^{\circ}\text{C}$ |

Objem kelímku:

$$\begin{aligned} V_k &= \frac{\pi}{4} \left[ (d_{\text{sk}} + 2s_k)^2 - d_{\text{sk}}^2 \right] (h_k + h_p) + \frac{\pi d_{\text{sk}}^2}{4} s_k = \\ &= \frac{\pi}{4} \left[ (0,33 \text{ m} + 2 \cdot 0,02 \text{ m})^2 - (0,33 \text{ m})^2 \right] \cdot (0,638 \text{ m} + 0,05 \text{ m}) + \frac{\pi \cdot (0,33 \text{ m})^2}{4} \cdot 0,02 \text{ m} = \\ &= \underline{16,841 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3} \end{aligned}$$

Objem 2. izolační vrstvy (žáruvzdorná vyzdívka):

$$\begin{aligned} V_2 &= \frac{\pi}{4} (3n_{\text{zl}} h_s + s_{\text{d},1}) \left[ (D_{\text{us}} + 2 \cdot 0,047 \text{ m} + 2s_2)^2 - (D_{\text{us}} + 2 \cdot 0,047 \text{ m})^2 \right] = \\ &= \frac{\pi}{4} (3 \cdot 3 \cdot 0,058 \text{ m} + 0,05 \text{ m}) \cdot \\ &\quad \cdot \left[ (0,476 \text{ m} + 2 \cdot 0,047 \text{ m} + 2 \cdot 0,1 \text{ m})^2 - (0,476 \text{ m} + 2 \cdot 0,047 \text{ m})^2 \right] = \underline{0,12 \text{ m}^3} \end{aligned}$$

Objem 3. izolační vrstvy (izolační tvárnice):

$$V_3 = \frac{\pi}{4} h_3 \left[ (D_{pl} - 2s_{pl})^2 - (D_{pl} - 2s_{pl} - 2s_3)^2 \right] =$$

$$= \frac{\pi}{4} \cdot 0,622 \text{ m} \left[ (1,15 \text{ m} - 2 \cdot 0,005 \text{ m})^2 - (1,15 \text{ m} - 2 \cdot 0,005 \text{ m} - 2 \cdot 0,19 \text{ m})^2 \right] = \underline{0,353 \text{ m}^3}$$

Objem keramických nosníků topných spirál:

$$V_1 = \frac{3\pi}{4} n_{zl} h_s \left[ (D_{us} + 2 \cdot 0,047 \text{ m})^2 - (D_{us} + 2 \cdot 0,025 \text{ m})^2 + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{2} \left( (D_{us} + 2 \cdot 0,025 \text{ m})^2 - (D_{us} - 2 \cdot 0,023 \text{ m})^2 \right) \right] =$$

$$= \frac{3\pi}{4} \cdot 3 \cdot 0,058 \text{ m} \cdot \left[ (0,476 \text{ m} + 2 \cdot 0,047 \text{ m})^2 - (0,476 \text{ m} + 2 \cdot 0,025 \text{ m})^2 + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{2} \left( (0,476 \text{ m} + 2 \cdot 0,025 \text{ m})^2 - (0,476 \text{ m} - 2 \cdot 0,023 \text{ m})^2 \right) \right] =$$

$$= \underline{38,584 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}$$

Objem všech spirál pece:

$$V_{sp} = 3L_{1f} \frac{\pi d^2}{4} = 3 \cdot 24,18 \text{ m} \cdot \frac{\pi \cdot (0,0019 \text{ m})^2}{4} = \underline{2,057 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3}$$

Objem ocelového pláště pece:

$$V_4 = \frac{\pi}{4} (h_3 + s_{d,2} + s_{d,3}) [D_{pl}^2 - (D_{pl} - 2s_{pl})^2] =$$

$$= \frac{\pi}{4} (0,622 \text{ m} + 0,18 \text{ m} + 0,05 \text{ m}) [(1,15 \text{ m})^2 - (1,15 \text{ m} - 2 \cdot 0,005 \text{ m})^2] = \underline{15,324 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}$$

Objem 1. izolační vrstvy dna:

$$V_{d,1} = \frac{\pi D_{d,1}^2 s_{d,1}}{4} = \frac{\pi \cdot (0,57 \text{ m})^2 \cdot 0,05 \text{ m}}{4} = \underline{12,759 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}$$

Objem 2. izolační vrstvy dna:

$$V_{d,2} = \frac{\pi(D_{pl} - 2s_{pl})^2 s_{d,2}}{4} = \frac{\pi(1,15\text{ m} - 2 \cdot 0,005\text{ m})^2 \cdot 0,18\text{ m}}{4} = \underline{0,184\text{ m}^3}$$

Objem víka pece:

$$V_v = \frac{\pi D_v^2 s_v}{4} = \frac{\pi \cdot (0,9\text{ m})^2 \cdot 0,3\text{ m}}{4} = \underline{0,191\text{ m}^3}$$

Tab. 3 Materiálové konstanty jednotlivých částí kelímkové pece [6]

| část pece                   | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $c$ [J·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> ] |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------|
| kelímek                     | 7250                        | 550                                         |
| spirály                     | 7150                        | 460                                         |
| vrstva keramických nosníků  | 2650                        | 830                                         |
| vrstva žáruvzdorné vyzdívky | 2450                        | 650                                         |
| vrstva izolačních tvárnic   | 900                         | 630                                         |
| plášť                       | 7850                        | 470                                         |
| dno – žáruvzdorná vyzdívka  | 2450                        | 650                                         |
| dno – izolační tvárnice     | 900                         | 630                                         |
| víko                        | 2450                        | 650                                         |

Akumulované teplo kelímku:

$$\begin{aligned}
 Q_{ak,k} &= V_k r_k c_k (J_{stř,k} - J_{okolí}) = \\
 &= 16,841 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot 7250 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 550 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot (736,1^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = \\
 &= \underline{48,089 \cdot 10^6 \text{ J}}
 \end{aligned}$$

Akumulované teplo spirál:

$$\begin{aligned}
 Q_{ak,sp} &= V_{sp} r_{sp} c_{sp} (J_{sp} - J_{okolí}) = \\
 &= 2,057 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot 7150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 460 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot (978,43^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = \\
 &= \underline{0,648 \cdot 10^6 \text{ J}}
 \end{aligned}$$

Akumulované teplo keramických nosníků:

$$\begin{aligned} Q_{ak,1} &= V_1 r_1 c_1 (J_{stř,1} - J_{okolí}) = \\ &= 38,584 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot 2650 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 830 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot (944,84^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = \\ &= \underline{78,487 \cdot 10^6 \text{ J}} \end{aligned}$$

Akumulované teplo žáruvzdorné vyzdívky:

$$\begin{aligned} Q_{ak,2} &= V_2 r_2 c_2 (J_{stř,2} - J_{okolí}) = \\ &= 0,12 \text{ m}^3 \cdot 2450 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 650 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot (796,68^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = \underline{148,424 \cdot 10^6 \text{ J}} \end{aligned}$$

Akumulované teplo izolačních tvárnic:

$$\begin{aligned} Q_{ak,3} &= V_3 r_3 c_3 (J_{stř,3} - J_{okolí}) = \\ &= 0,353 \text{ m}^3 \cdot 900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 630 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot (363,69^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = \underline{68,790 \cdot 10^6 \text{ J}} \end{aligned}$$

Akumulované teplo ocelového pláště:

$$\begin{aligned} Q_{ak,4} &= V_4 r_4 c_4 (J_{stř,4} - J_{okolí}) = \\ &= 15,324 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 470 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot (30^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = \underline{0,565 \cdot 10^6 \text{ J}} \end{aligned}$$

Akumulované teplo žáruvzdorné vyzdívky dna:

$$\begin{aligned} Q_{ak,d,1} &= V_{d,1} r_{d,1} c_{d,1} (J_{stř,d} - J_{okolí}) = \\ &= 12,759 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot 2450 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 650 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot (504,215^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = \\ &= \underline{9,839 \cdot 10^6 \text{ J}} \end{aligned}$$

Akumulované teplo izolačních tvárnic dna:

$$\begin{aligned} Q_{ak,d,2} &= V_{d,2} r_{d,2} c_{d,2} (J_{stř,d} - J_{okolí}) = \\ &= 0,184 \text{ m}^3 \cdot 900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 630 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot (504,215^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = \underline{50,517 \cdot 10^6 \text{ J}} \end{aligned}$$

### Akumulované teplo víka pece:

$$Q_{ak,v} = V_v r_v c_v (J_{stř,v} - J_{okolí}) =$$
$$= 0,191 \text{ m}^3 \cdot 2450 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 650 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot (377,5 ^\circ\text{C} - 20 ^\circ\text{C}) = \underline{108,740 \cdot 10^6 \text{ J}}$$

### Celkové akumulované teplo pece:

$$Q_{ak} = \sum_i Q_{ak,i} = Q_{ak,k} + Q_{ak,sp} + Q_{ak,1} + Q_{ak,2} + Q_{ak,3} + Q_{ak,4} + Q_{ak,d,1} + Q_{ak,d,2} + Q_{ak,v} =$$
$$= (48,089 + 0,648 + 78,487 + 148,424 + 68,79 + 0,565 + 9,839 + 50,517 + 108,74) \cdot$$
$$\cdot 10^6 \text{ J} = \underline{514,099 \cdot 10^6 \text{ J}}$$

### **Doba tavení**

#### Doba náběhu pece:

$$t_n = \frac{Q_{ak}}{3600(P_c - 1,1P_{zc})} = \frac{514,099 \cdot 10^6 \text{ J}}{3600(37323 \text{ W} - 1,1 \cdot 2787,84 \text{ W})} = \underline{4,17 \text{ h}}$$

#### Vlastní doba tavení:

$$t_{tav} = \frac{Q_u}{3600(P_c - 1,1P_{zc})} = \frac{123,322 \cdot 10^6 \text{ J}}{3600(37323 \text{ W} - 1,1 \cdot 2787,84 \text{ W})} = \underline{1,00 \text{ h}}$$

#### Celková doba:

$$t_c = t_n + t_{tav} = 4,17 \text{ h} + 1,00 \text{ h} = 5,17 \text{ h} = \underline{5 \text{ h } 10 \text{ min}}$$

### **Shrnutí základních parametrů kelímkové pece**

|                                       |                                                      |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Hmotnost vsázky (granulovaný hliník): | $m = 100 \text{ kg}$                                 |
| Počáteční teplota vsázky:             | $J_0 = 20 ^\circ\text{C}$                            |
| Teplota přetavení vsázky:             | $J_2 = 725 ^\circ\text{C}$                           |
| Doba náběhu prázdné pece:             | $t_n = 4,17 \text{ h} = 4 \text{ h } 10 \text{ min}$ |
| Doba ohřevu vsázky:                   | $t_{tav} = 1,00 \text{ h}$                           |
| Celková doba tavení i s náběhem pece: | $t_c = 5,17 \text{ h} = 5 \text{ h } 10 \text{ min}$ |

Materiál drátu:

Průměr drátu:

Délka drátu na 1 fázi:

Vnější průměr spirály:

Stoupání spirály:

Počet závitů na 1 spirálu:

Kanthal A-1

$d = 1,9 \text{ mm}$

$L_{1f} = 24,18 \text{ m}$

$D = 13,3 \text{ mm}$

$s = 6,76 \text{ mm}$

222

Tab. 4 Topné dráty KANTHAL A-1, APM [6]

| KANTHAL A-1, APM Wire |  |  |  |  |  |  | Standard stock items | Alloy       | Diameter range mm | Resistivity $\Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1}$ | Density $\text{gcm}^{-3}$ |
|-----------------------|--|--|--|--|--|--|----------------------|-------------|-------------------|----------------------------------------------|---------------------------|
|                       |  |  |  |  |  |  | ■                    | KANTHAL A-1 | 10.0-0.050        | 1.45                                         | 7.10                      |
|                       |  |  |  |  |  |  | ■                    | KANTHAL APM | 10.0-0.20         | 1.45                                         | 7.10                      |

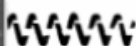
To obtain resistance at working temperature, multiply by the factor  $C_t$  in the following table:

| °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 |      | at 20 °C $\Omega/\text{m}$ | Resistance $\text{cm}^2/(\Omega^\circ)$ at 20 °C | Weight g/m | Surface area $\text{cm}^2/\text{m}$ | Cross sectional area $\text{mm}^2$ |
|-------------|------|----------------------------|--------------------------------------------------|------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| A-1         | 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                               |

| Diameter mm |     | at 20 °C $\Omega/\text{m}$ | Resistance $\text{cm}^2/(\Omega^\circ)$ at 20 °C | Weight g/m | Surface area $\text{cm}^2/\text{m}$ | Cross sectional area $\text{mm}^2$ |
|-------------|-----|----------------------------|--------------------------------------------------|------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| A-1         | 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                              |

Tab. 5 Dovolené zatížení drátů KANTHAL – část 1 [6]



Proudové zatížení drátů vinutých do spirál na trn o průměru  $\frac{3}{16}$ " (4.763 mm). Okolí: Klidný vzduch o teplotě cca 20° C.

| Ø<br>mm | 200° C |      |       | 400° C |      |       | 600° C |      |       | 700° C |      |       | 800° C |      |       |
|---------|--------|------|-------|--------|------|-------|--------|------|-------|--------|------|-------|--------|------|-------|
|         | A      | V/m  | W/cm² | A      | V/m  | W/cm² | A      | V/m  | W/cm² | A      | V/m  | W/cm² | A      | V/m  | W/cm² |
| 2.20    | 7.64   | 2.81 | 0.310 | 12.7   | 4.84 | 0.920 | 20.4   | 7.61 | 2.25  | 25.0   | 9.40 | 3.40  | 30.2   | 11.4 | 5.00  |
| 2.10    | 7.14   | 2.86 | 0.312 | 12.3   | 4.98 | 0.924 | 19.0   | 7.84 | 2.26  | 23.4   | 9.64 | 3.42  | 28.2   | 11.7 | 5.02  |
| 2.00    | 6.66   | 2.96 | 0.314 | 11.4   | 5.11 | 0.928 | 18.7   | 8.05 | 2.27  | 21.8   | 9.89 | 3.44  | 26.4   | 12.0 | 5.04  |
| 1.90    | 6.15   | 3.05 | 0.316 | 10.6   | 5.26 | 0.932 | 16.5   | 8.30 | 2.29  | 20.3   | 10.1 | 3.46  | 24.5   | 12.3 | 5.06  |
| 1.80    | 5.72   | 3.14 | 0.318 | 9.79   | 5.41 | 0.936 | 15.3   | 8.53 | 2.31  | 18.8   | 10.5 | 3.48  | 22.6   | 12.7 | 5.08  |
| 1.70    | 5.27   | 3.24 | 0.320 | 9.00   | 5.58 | 0.940 | 14.1   | 8.82 | 2.33  | 17.2   | 10.8 | 3.50  | 20.8   | 13.1 | 5.10  |
| 1.60    | 4.83   | 3.35 | 0.322 | 8.25   | 5.68 | 0.948 | 12.9   | 9.14 | 2.35  | 15.8   | 11.2 | 3.53  | 19.1   | 13.6 | 5.14  |
| 1.50    | 4.39   | 3.47 | 0.324 | 7.53   | 5.98 | 0.956 | 11.8   | 9.48 | 2.37  | 14.4   | 11.6 | 3.56  | 17.2   | 14.1 | 5.18  |
| 1.40    | 3.98   | 3.61 | 0.326 | 6.81   | 6.23 | 0.964 | 10.7   | 9.86 | 2.39  | 13.1   | 12.1 | 3.60  | 15.7   | 14.6 | 5.22  |
| 1.30    | 3.77   | 3.75 | 0.328 | 6.13   | 6.49 | 0.972 | 9.58   | 10.2 | 2.41  | 11.8   | 12.6 | 3.64  | 14.1   | 15.2 | 5.26  |
| 1.25    | 3.37   | 3.87 | 0.330 | 5.79   | 6.64 | 0.980 | 9.07   | 10.5 | 2.43  | 11.2   | 12.9 | 3.68  | 13.4   | 15.6 | 5.30  |
| 1.20    | 3.19   | 3.99 | 0.333 | 5.48   | 6.80 | 0.987 | 8.56   | 10.7 | 2.44  | 10.5   | 13.2 | 3.70  | 12.6   | 15.9 | 5.33  |
| 1.15    | 3.00   | 4.00 | 0.336 | 5.15   | 6.97 | 0.994 | 8.04   | 11.0 | 2.45  | 9.90   | 13.6 | 3.72  | 11.9   | 16.3 | 5.36  |
| 1.10    | 2.83   | 4.13 | 0.340 | 4.83   | 7.15 | 1.000 | 7.56   | 11.3 | 2.47  | 9.29   | 13.9 | 3.74  | 11.1   | 16.8 | 5.40  |

#### KANTHAL A-1

Potřebné údaje v ampérech pro KANTHAL A-1 minus 2%  
Potřebné údaje ve voltech pro KANTHAL A-1 plus 2%

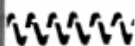
#### KANTHAL DS

Potřebné údaje v ampérech pro KANTHAL DS plus 1.5%  
Potřebné údaje ve voltech pro KANTHAL DS minus 1.5%

Po navinutí jsou spirály roztaženy na dvojnásobnou délku. Jako podložky je použito šamotu.

| Ø<br>mm | 900° C |      |       | 1000° C |      |       | 1100° C |      |       | 1200° C |      |       | 1300° C |      |       |
|---------|--------|------|-------|---------|------|-------|---------|------|-------|---------|------|-------|---------|------|-------|
|         | A      | V/m  | W/cm² | A       | V/m  | W/cm² | A       | V/m  | W/cm² | A       | V/m  | W/cm² | A       | V/m  | W/cm² |
| 2.20    | 34.9   | 13.4 | 6.80  | 41.2    | 15.8 | 9.40  | 46.5    | 17.8 | 12.0  | 51.3    | 19.8 | 14.8  | 56.7    | 22.0 | 18.0  |
| 2.10    | 32.8   | 13.6 | 6.82  | 38.5    | 16.2 | 9.44  | 43.5    | 18.3 | 12.1  | 48.2    | 20.4 | 14.9  | 53.0    | 22.5 | 18.1  |
| 2.00    | 30.6   | 14.1 | 6.84  | 35.9    | 16.6 | 9.48  | 40.5    | 18.8 | 12.1  | 44.9    | 20.9 | 15.0  | 49.3    | 23.2 | 18.2  |
| 1.90    | 27.2   | 14.4 | 6.86  | 33.3    | 17.1 | 9.52  | 37.6    | 19.4 | 12.2  | 41.8    | 21.6 | 15.1  | 46.0    | 23.8 | 18.3  |
| 1.80    | 26.2   | 14.8 | 6.88  | 30.8    | 17.6 | 9.56  | 34.7    | 19.9 | 12.2  | 38.6    | 22.2 | 15.2  | 42.7    | 24.5 | 18.4  |
| 1.70    | 24.2   | 15.4 | 7.00  | 28.3    | 18.1 | 9.60  | 32.0    | 20.6 | 12.3  | 35.6    | 22.9 | 15.3  | 39.1    | 25.3 | 18.6  |
| 1.60    | 22.2   | 16.0 | 7.08  | 25.9    | 18.8 | 9.68  | 29.3    | 21.3 | 12.4  | 32.7    | 23.8 | 15.5  | 35.8    | 26.3 | 18.7  |
| 1.50    | 20.3   | 16.6 | 7.16  | 23.6    | 19.5 | 9.76  | 26.7    | 22.1 | 12.5  | 29.9    | 24.8 | 15.7  | 32.8    | 27.4 | 19.0  |
| 1.40    | 18.4   | 17.3 | 7.24  | 21.4    | 20.2 | 9.84  | 24.2    | 22.9 | 12.6  | 27.1    | 25.9 | 15.9  | 29.6    | 28.2 | 19.1  |
| 1.30    | 16.6   | 18.0 | 7.32  | 19.3    | 21.1 | 9.92  | 21.8    | 23.9 | 12.7  | 24.4    | 26.9 | 16.1  | 26.6    | 29.5 | 19.2  |
| 1.25    | 15.7   | 18.5 | 7.40  | 18.2    | 21.6 | 10.0  | 20.6    | 24.4 | 12.8  | 23.1    | 27.6 | 16.2  | 24.7    | 30.1 | 19.3  |
| 1.20    | 14.8   | 18.9 | 7.45  | 17.1    | 22.0 | 10.0  | 19.4    | 25.1 | 12.9  | 21.7    | 28.1 | 16.2  | 23.7    | 30.8 | 19.4  |
| 1.15    | 13.9   | 19.4 | 7.50  | 16.1    | 22.6 | 10.1  | 18.4    | 25.5 | 12.9  | 20.5    | 28.9 | 16.3  | 22.3    | 31.7 | 19.6  |
| 1.10    | 13.1   | 19.9 | 7.55  | 15.1    | 23.1 | 10.1  | 17.1    | 26.2 | 13.0  | 19.2    | 29.6 | 16.4  | 21.0    | 32.6 | 19.8  |

Tab. 6 Dovolené zatížení drátů KANTHAL – část 2 [6]



Proudové zatížení drátů vinutých do spirál na trn o průměru 1/8" (3.175 mm). Okolí: Klidný vzduch o teplotě cca 20° C.

| Ø<br>mm | 200° C |      |       | 400° C |      |       | 600° C |      |       | 700° C |      |       | 800° C |      |       |
|---------|--------|------|-------|--------|------|-------|--------|------|-------|--------|------|-------|--------|------|-------|
|         | A      | V/m  | W/cm² | A      | V/m  | W/cm² | A      | V/m  | W/cm² | A      | V/m  | W/cm² | A      | V/m  | W/cm² |
| 1.05    | 2.48   | 4.00 | 0.300 | 4.21   | 6.83 | 0.870 | 6.61   | 10.9 | 2.18  | 8.13   | 13.4 | 3.30  | 9.69   | 16.0 | 4.70  |
| 1.00    | 2.31   | 4.11 | 0.302 | 3.92   | 7.03 | 0.878 | 6.18   | 11.2 | 2.20  | 7.58   | 13.8 | 3.32  | 9.04   | 16.5 | 4.74  |
| 0.95    | 2.14   | 4.23 | 0.304 | 3.65   | 7.25 | 0.886 | 5.74   | 11.5 | 2.22  | 7.04   | 14.1 | 3.34  | 8.41   | 17.0 | 4.78  |
| 0.90    | 1.91   | 4.36 | 0.306 | 3.38   | 7.47 | 0.894 | 5.32   | 11.9 | 2.24  | 6.51   | 14.6 | 3.36  | 7.78   | 17.5 | 4.82  |
| 0.85    | 1.83   | 4.50 | 0.308 | 3.12   | 7.73 | 0.902 | 4.91   | 12.3 | 2.27  | 6.00   | 15.1 | 3.39  | 7.17   | 18.1 | 4.86  |
| 0.80    | 1.70   | 4.73 | 0.320 | 2.84   | 8.01 | 0.91  | 4.52   | 12.8 | 2.30  | 5.52   | 15.6 | 3.43  | 6.58   | 18.7 | 4.90  |
| 0.75    | 1.56   | 4.91 | 0.324 | 2.61   | 8.32 | 0.92  | 4.13   | 13.3 | 2.33  | 5.03   | 16.2 | 3.47  | 6.02   | 19.5 | 4.98  |
| 0.70    | 1.41   | 5.12 | 0.328 | 2.40   | 8.69 | 0.94  | 3.75   | 13.8 | 2.36  | 4.56   | 16.9 | 3.50  | 5.48   | 20.3 | 5.06  |
| 0.65    | 1.27   | 5.34 | 0.332 | 2.15   | 9.13 | 0.96  | 3.38   | 14.5 | 2.39  | 4.11   | 17.6 | 3.55  | 4.93   | 21.3 | 5.14  |
| 0.60    | 1.13   | 5.59 | 0.336 | 1.92   | 9.58 | 0.98  | 3.01   | 15.1 | 2.42  | 3.67   | 18.5 | 3.60  | 4.39   | 22.3 | 5.22  |
| 0.55    | 0.998  | 5.88 | 0.340 | 1.71   | 10.1 | 1.00  | 2.66   | 15.9 | 2.45  | 3.23   | 19.5 | 3.65  | 3.89   | 23.5 | 5.30  |
| 0.50    | 0.867  | 6.24 | 0.348 | 1.50   | 10.7 | 1.02  | 2.33   | 16.9 | 2.50  | 2.85   | 20.6 | 3.74  | 3.42   | 25.0 | 5.43  |
| 0.45    | 0.758  | 6.65 | 0.356 | 1.29   | 11.4 | 1.04  | 2.01   | 18.0 | 2.55  | 2.46   | 22.0 | 3.83  | 2.96   | 26.6 | 5.56  |
| 0.40    | 0.741  | 7.13 | 0.364 | 1.09   | 12.2 | 1.06  | 1.70   | 19.2 | 2.60  | 2.08   | 23.6 | 3.92  | 2.49   | 28.5 | 5.69  |
| 0.35    | 0.532  | 7.70 | 0.371 | 0.901  | 13.2 | 1.08  | 1.40   | 20.7 | 2.65  | 1.73   | 25.6 | 4.01  | 2.07   | 30.8 | 5.82  |
| 0.30    | 0.427  | 8.41 | 0.380 | 0.725  | 14.4 | 1.11  | 1.12   | 22.6 | 2.70  | 1.39   | 27.9 | 4.10  | 1.67   | 33.7 | 5.95  |

#### KANTHAL A-1

Potřebné údaje v ampérech pro KANTHAL A-1 minus 2%  
Potřebné údaje ve voltech pro KANTHAL A-1 plus 2%

#### KANTHAL DS

Potřebné údaje v ampérech pro KANTHAL DS plus 1.5%  
Potřebné údaje ve voltech pro KANTHAL DS minus 1.5%

Po navinutí jsou spirály roztaheny na dvojnásobnou délku. Jako podložky je použito šamotu.

| Ø<br>mm | 900° C |      |       | 1000° C |      |       | 1100° C |      |       | 1200° C |      |       | 1300° C |      |       |
|---------|--------|------|-------|---------|------|-------|---------|------|-------|---------|------|-------|---------|------|-------|
|         | A      | V/m  | W/cm² | A       | V/m  | W/cm² | A       | V/m  | W/cm² | A       | V/m  | W/cm² | A       | V/m  | W/cm² |
| 1.05    | 11.3   | 18.9 | 6.50  | 13.1    | 22.0 | 8.70  | 15.0    | 24.2 | 11.5  | 16.9    | 28.3 | 14.4  | 19.4    | 31.7 | 17.8  |
| 1.00    | 10.6   | 19.5 | 6.56  | 12.2    | 22.6 | 8.78  | 14.0    | 26.0 | 11.6  | 15.6    | 29.2 | 14.5  | 17.3    | 32.5 | 17.9  |
| 0.95    | 9.84   | 20.1 | 6.62  | 10.7    | 23.3 | 8.86  | 13.1    | 26.8 | 11.7  | 14.6    | 30.1 | 14.6  | 16.1    | 33.5 | 18.0  |
| 0.90    | 9.12   | 20.7 | 6.68  | 9.91    | 24.0 | 8.94  | 12.1    | 27.7 | 11.8  | 13.1    | 30.9 | 14.7  | 14.8    | 34.4 | 18.1  |
| 0.85    | 8.41   | 21.4 | 6.74  | 9.70    | 24.8 | 9.02  | 11.1    | 28.6 | 11.9  | 12.4    | 31.9 | 14.8  | 13.7    | 35.6 | 18.3  |
| 0.80    | 7.71   | 22.2 | 6.80  | 8.89    | 25.7 | 9.10  | 10.2    | 29.6 | 12.0  | 11.4    | 33.2 | 15.0  | 12.5    | 36.9 | 18.5  |
| 0.75    | 7.07   | 23.1 | 6.94  | 8.14    | 26.9 | 9.28  | 9.33    | 30.8 | 12.2  | 10.3    | 34.5 | 15.2  | 11.5    | 38.5 | 18.8  |
| 0.70    | 6.44   | 24.2 | 7.08  | 7.42    | 28.0 | 9.46  | 8.48    | 32.1 | 12.4  | 9.43    | 35.9 | 15.4  | 10.5    | 40.1 | 19.1  |
| 0.65    | 5.83   | 25.3 | 7.22  | 6.71    | 29.3 | 9.64  | 7.66    | 33.7 | 12.6  | 8.50    | 37.5 | 15.6  | 9.46    | 41.9 | 19.4  |
| 0.60    | 5.09   | 26.1 | 7.26  | 6.00    | 30.9 | 9.82  | 6.83    | 35.3 | 12.8  | 7.59    | 39.4 | 15.9  | 8.45    | 44.0 | 19.7  |
| 0.55    | 4.62   | 28.0 | 7.50  | 5.31    | 32.5 | 10.0  | 6.04    | 37.1 | 13.0  | 6.73    | 41.5 | 16.2  | 7.46    | 46.3 | 20.0  |
| 0.50    | 4.04   | 29.7 | 7.64  | 4.66    | 34.4 | 10.2  | 5.28    | 39.3 | 13.2  | 5.89    | 44.0 | 16.5  | 6.27    | 49.0 | 20.4  |
| 0.45    | 3.48   | 31.6 | 7.78  | 4.14    | 36.7 | 10.4  | 4.54    | 41.8 | 13.4  | 4.87    | 46.6 | 16.8  | 5.40    | 52.2 | 20.8  |
| 0.40    | 2.95   | 33.8 | 7.92  | 3.39    | 39.3 | 10.6  | 3.83    | 44.6 | 13.6  | 4.28    | 50.1 | 17.1  | 4.77    | 55.9 | 21.2  |
| 0.35    | 2.43   | 36.5 | 8.06  | 2.80    | 42.4 | 10.8  | 3.17    | 48.1 | 13.9  | 3.55    | 54.0 | 17.4  | 3.94    | 60.3 | 21.6  |
| 0.30    | 1.94   | 39.7 | 8.20  | 2.25    | 46.2 | 11.0  | 2.53    | 52.6 | 14.2  | 2.84    | 59.0 | 17.8  | 3.15    | 65.7 | 22.0  |

## 6 Závěr

Odporové teplo je ze všech druhů elektrického tepla využíváno v průmyslu nejvšestranněji. Na principu přímého i nepřímého odporového ohřevu pracuje celá řada různých odporových pecí a zařízení, což je patrné i z předchozího textu.

Jednou ze základních částí elektrotepelných zařízení pracujících s nepřímým odporovým ohřevem jsou topné články. V textu jsou uvedeny všechny základní materiály i konstrukce článků. Při volbě článků je rozhodující obvykle jmenovitá teplota pece, chemické prostředí, ve kterém je článek instalovaný, místo pro jeho zabudování a v poslední řadě i cena článku.

Co se týče navrhování elektrických odporových pecí, jde nesporně o velmi složité a zdoluhavé výpočty, které se nezdá opírat o přesná a náročná měření a dlouholeté zkušenosti z provozu podobných zařízení. Návrh pece vyžaduje mnoho technických kompromisů, zkušeností i ekonomických úvah.

Výpočet návrhu kelímkové pece, který tvoří nejdůležitější část bakalářské práce, vychází z předpokladu, že jsou známy rozměry pece a jejích nejdůležitějších částí, dále materiály, z nichž je zhotovena tepelná izolace pece a že jsou dány požadavky na zařízení, které se týkají především hmotnosti vsázky, výsledné teploty taveniny a doby tavení. Výpočet je tedy zaměřen na návrh topných elementů. Cílem bylo nalézt vhodný materiál, ze kterého budou topné spirály zhotoveny, dále určit vhodný průměr drátu, vnější průměr a stoupání závitů topných spirál a délku drátu potřebnou k výrobě spirál (celkovou i na 1 fázi) – vše samozřejmě s ohledem na rozměry pece a povolené povrchové zatížení vodičů.

K příkladu výpočtu jsem použil nákres pece a jejích hlavních částí, který je uveden na obr. 28, 29 a 30, včetně rozměrů. Jako vstupní požadavky jsem zvolil následující údaje: pec, jejíž provozní napětí je 400 V a jejíž topné spirály budou zapojeny do trojúhelníka, musí za 1 h roztavit a ohřát na výslednou teplotu 725 °C 100 kg vsázky, kterou tvoří granulovaný hliník s počáteční teplotou 20 °C. Výsledkem výpočtu je, že drát použitý k výrobě topných elementů musí mít průměr 1,9 mm a délku na 1 fázi 24,18 m. Materiál topných spirál volíme z příslušných tabulek (viz tab. 4) – zvolil jsem KANTHAL A-1. Je důležité porovnat dovolené povrchové zatížení vodičů s vypočteným povrchovým zatížením. Vypočtené povrchové zatížení musí být vždy menší nebo rovno dovolenému povrchovému zatížení. S ohledem na rozmístění topných článků v peci (a tím na rovnoměrnost ohřevu) jsem navrhl vnější průměr spirály 13,3 mm a vypočtené stoupání závitů spirály je 6,76 mm, což při rozměrech pece a počtu keramických nosníků spirál na 1 fázi odpovídá 222 závitům na jednu spirálu. Takto navržené topné elementy rozežřejí pec na provozní teplotu za 4 h 10 min a vlastní doba tavení vsázky je pak požadovaná 1 h.

Program pro automatizovaný výpočet návrhu kelímkové pece, který je nedílnou součástí této bakalářské práce, umožňuje pochopitelně výpočet s jinými vstupními parametry. Stejně jako vstupní veličiny lze měnit i materiálové konstanty a rozměry jednotlivých částí pece. Výstupními hodnotami jsou především parametry topných elementů, přičemž jsou k dispozici i jiné vypočtené hodnoty, jako např. příkon pece, akumulované teplo nebo doba náběhu pece. Program byl vytvořen v aplikaci Microsoft Office Excel.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] RADA, J. A KOL.: *Elektrotepelná technika*. Praha: SNTL/ALFA, 1985, 352 stran.
- [2] LANGER, E.: *Elektrotepelná technika – Společné základy – Elektrické pece odporové*. Praha: SNTL, 1968, 136 stran.
- [3] NOVÁK, P., KOLESÁR, J.: *Elektrotepelná technika*. Bratislava: ALFA, 1990, 216 stran. ISBN 80-05-00426-5.
- [4] NOVÁK, P., KOLESÁR, J.: *Elektrotepelná technika – návody na cvičenia*. Košice: ES VŠT, 1988, 190 stran.
- [5] HRADÍLEK, Z.: *Elektrotepelná technika*. Ostrava: ES VŠB, 1996, 237 stran. ISBN 80-7078-323-0.
- [6] BAXANT, P., DRÁPELA, J., LÁZNIČKOVÁ, I.: *Elektrotepelná technika*. Brno: VUT, elektronický učební text.