

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Přednosti elektrotepelných technologií**

*Originál (kopie) zadání BP/DP*

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce se zaměřuje na přednosti elektrotepelných procesů a jejich využití v průmyslu. V první kapitole se zmíním o základních průmyslových procesech a ve druhé kapitole navážu na jednotlivé elektrotepelné technologie které lze v průmyslu využít. Ve třetí kapitole navážu na výrobu technologického tepla za pomoci neelektrických technologií. Na závěr práce provedu porovnání mezi elektrickými a neelektrickými technologiemi, úvahu o perspektivě technologií a zhodnotím ekonomické, ekologické a energetické hledisko, tedy kritérium 3E.

## **Klíčová slova**

žihání, kalení, tváření, tavení, pece, indukce, svařování, ohřev, laser, plamen, studený kelímek, kritérium 3E, technologie

## **Abstract**

The presented bachelor thesis focuses on the advantages of electrothermal processes and their use in industry. In the first chapter I will mention the basic industrial processes and in the second chapter I will link to individual electrothermal technologies that can be used in industry. In the third chapter I will build on the production of technological heat using non-electric technologies. At the end of the work I will make a comparison between electrical and non-electrical technologies, consider the perspective of technology and evaluate the economic, environmental and energy aspects, ie. criterion 3E.

## **Key words**

annealing, hardening, forming, melting, furnaces, induction, welding, heating, laser, flame, cold crucible, criterion 3E, technologies

## Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 8.6.2020

Jméno příjmení

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení mé práce.

# Obsah

<b>OBSAH.....</b>	<b>7</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>10</b>
<b>1 ZÁKLADNÍ TEPELNÉ PROCESY.....</b>	<b>11</b>
1.1 KALENÍ.....	11
1.2 ŽIHÁNÍ.....	11
1.3 TVÁŘENÍ.....	11
1.4 TAVENÍ.....	12
1.5 SVAŘOVÁNÍ.....	12
<b>2 ELEKTRICKÉ OHŘEVY.....</b>	<b>13</b>
2.1 ELEKTROTEPELNÁ ZAŘÍZENÍ ODPOROVÁ.....	13
2.1.1 Přímý odporový ohřev.....	13
2.1.2 Ohřev dlouhých kovových tyčí.....	13
2.1.3 Elektroodové solné lázně.....	14
2.1.4 Nepřímý elektrický ohřev.....	14
2.1.5 Odporové pece se stabilní vsázkou.....	15
2.1.6 Odporové pece průběžné.....	17
2.1.7 Využití odporových pecí.....	17
2.2 INDUKČNÍ ELEKTROTEPELNÁ ZAŘÍZENÍ.....	18
2.2.1 Druhy elektrických indukčních zařízení.....	19
2.2.2 Indukční kelímkové pece.....	20
2.2.3 Indukční kanálkové pece.....	21
2.2.4 Využití indukčních zařízení v praxi.....	22
2.3 STUDENÝ KELÍMEK.....	22
2.3.1 Aplikace studeného kelímku.....	23
2.4 DIELEKTRICKÝ OHŘEV.....	24
2.4.1 Nesourodá dielektrika.....	25
2.4.2 Aplikace dielektrického ohřevu.....	25
2.5 MIKROVLNNÝ OHŘEV.....	26
2.5.1 Mikrovlnné zdroje záření.....	26
2.5.2 Aplikace mikrovlnného ohřevu.....	27
2.6 ELEKTRICKÉ OBLOUKOVÉ PECE.....	27
2.6.1 Obloukové pece se stejnosměrným obloukem.....	27
2.6.2 Obloukové pece se střídavým obloukem.....	28
2.6.3 Rozdělení obloukových pecí podle způsobu hoření oblouku.....	28
2.7 PLAZMOVÁ ELEKTROTEPELNÁ ZAŘÍZENÍ.....	30
2.7.1 Aplikace plazmového ohřevu.....	31
2.8 ELEKTRONOVÁ ZAŘÍZENÍ.....	32
2.8.1 Aplikace elektronového ohřevu.....	33
2.9 LASEROVÉ ELEKTROTEPELNÉ ZAŘÍZENÍ.....	33
2.9.1 Typy laseru.....	34
2.9.2 Aplikace laseru.....	35
<b>3 NEKONVENČNÍ OHŘEVY.....</b>	<b>36</b>
3.1 OHŘEVY PLAMENEM.....	36
3.2 OHŘEV ZA POMOCÍ SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ.....	37
<b>4 POROVNÁNÍ ELEKTRICKÝCH A NEELEKTRICKÝCH TEPELNÝCH PROCESŮ.....</b>	<b>38</b>

<b>5 PERSPEKTIVA JEDNOTLIVÝCH PROCESŮ.....</b>	<b>40</b>
<b>6 HODNOCENÍ ELEKTROTEPELNÝCH TECHNOLOGIÍ KRITERIEM 3E.....</b>	<b>41</b>
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>43</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....</b>	<b>45</b>



## Úvod

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na téma přednosti elektrotepelných technologií. Jedná se tedy o technologie využívající elektrickou energii pro vznik tepla. Toto technologické teplo lze získat i jiným způsobem než přeměnou elektrické energie. Mezi tyto způsoby patří teplo získané spalování fosilních paliv, plynu, ropy či využitím sluneční energie.

V dnešní době se technologické teplo nejčastěji vytváří elektrotepelnými procesy, které mají na rozdíl od spalování fosilních paliv nespočetné výhody. Jednou z největších výhod je velké množství technologií, kterými lze technologické teplo vyrobit a poté ho dopravit do vsázky. Díky velkému množství technologií, je využití elektrotepelných zařízení, téměř ve všech průmyslových odvětvích. Mezi další důvody využití elektrotepelných procesů je i vzrůstající cena paliv a ubývání zásob.

V první kapitole se popisují základní tepelné procesy. Uvádím základní procesy jako jsou kalení, žíhání, svařování, tavení a tváření. Úvodem informuji o základních principech těchto procesů a přibližných používaných teplot.

Ve druhé a třetí kapitole se zabývám elektrotepelnými technologiemi a ohřevy za pomoci plamene, od často používaných technologií, až po technologie méně používané. Začátkem stručně přiblížím principy jednotlivých technologií, základní konstrukce zařízení a uvedu aplikaci zařízení.

Závěrem porovnávám jednotlivé technologie a uvádím jejich využití pro technologické procesy. Poté uvádím perspektivu jednotlivých procesů a hodnotím je kritériem 3E. V samotném závěru hodnotím předloženou práci z pohledu získaných informací získaných jejím zpracováním.

## Seznam symbolů a zkratek

Q	.....	Elektrický náboj	.....	[C]
Q	.....	Teplo	.....	[J]
R	.....	Elektrický odpor	.....	[ $\Omega$ ]
I	.....	Elektrický proud	.....	[A]
U	.....	Elektrické napětí	.....	[V]
t	.....	Čas	.....	[s]
P	.....	Výkon	.....	[W]
S	.....	Plocha	.....	[m <sup>2</sup> ]
$\mu$	.....	Permeabilita	.....	[H/m]
$\rho$	.....	Rezistivita	.....	[ $\Omega$ /m]
f	.....	Frekvence	.....	[Hz]
$\gamma$	.....	Elektrická vodivost	.....	[S/m]
$\varphi$	.....	Účinnost	.....	[-]
a	.....	Hloubka vniku	.....	[m]
l	.....	Délka	.....	[m]
$\omega$	.....	Úhlová rychlost	.....	[s <sup>-1</sup> ]
$\delta$	.....	Délka	.....	[cm]
$\varepsilon$	.....	Permitivita	.....	[F/m]
SUSEN	.....	Sustainable Energy		
YAG	.....	Yttrium aluminium garnet (Yttrito-hlinitý granát)		
Nd	.....	Neodym		

# 1 Základní tepelné procesy

## 1.1 Kalení

Jedná se o tepelné zpracování ocelí, při kterém ohřejeme vsázku na kalící teplotu a následně prudce vsázku ochladíme. Tímto způsobem lze získat lepší mechanické a fyzikální vlastnosti. Dochází tím ke zvýšení tvrdosti, ale zároveň ke snížení houževnatosti a vsázka se stává křehčí. Povrchové kalení je používáno u ocelí s obsahem uhlíku vyšším než 0.35 %. Nejekonomičtějším způsobem je ohřev pouze zakalené vrstvy, tím jádro vsázky zůstává nezakalené. Teplota kalení bývá okolo 900 °C. [8],[13]

## 1.2 Žihání

Tento proces se využívá za účelem odstranění vlivů jiných procesů jako je kalení, či tváření a umožňuje zlepšit vlastnosti jako například povrchová tvrdost. Při tomto procesu ohřejeme vsázku na žihací teplotu a udržujeme jí na této teplotě určitou dobu, poté jí necháme pomalu chladnout. Žihání můžeme rozdělit na žihání normalizační, naměkko, které jsou vhodné převážně pro legované oceli, dalšími druhy jsou homogenizační či rekrystalizační atp. Žihací teplota bývá okolo 600 °C až 1 200 °C. [9],[11]

## 1.3 Tváření

Jedná se o technologický proces u kterého dochází k požadované změně tvaru výrobku, případně ke změně vlastností. Principem je vznik plastické deformace, díky které jsou způsobeny fyzikálními a strukturálními změnami v materiálu. Podle teploty můžeme rozdělit tváření na dva základní procesy:

- Za tepla – probíhá při teplotě vyšší než je teplota tavení v materiálu. Při tomto procesu dochází k odstranění zpevnění vzniklého při tváření rychlou rekrystalizací. Z důvodu menšího zpevnění je možné zde využít daleko nižší síly než u tváření za studena. Jedním z vlivů tváření je vznik vláknité struktury, která ovlivňuje mechanické vlastnosti. Výhodou je odstranění trhlin a vzniklých bublinek a snížení potřebné síly. Nevýhodou je zdlouhavý a nákladný proces.

- Za studena – probíhá při teplotě nižší než je teplota tavení materiálu. Při tváření dochází k zpevnování materiálu, kterou si materiál zachovává. Tím se zvyšují mechanické vlastnosti, ale zároveň se snižuje tažnost. Výhodou tohoto procesu je vysoká přesnost, kvalita vzniklého povrchu a zlepšení zpevnění. Mezi nevýhody se dá zařadit nutnost použití značných tvářecí sil a omezená tvárnost materiálu.

Největší předností tváření je ovšem vysoká produktivita práce a vysoká přesnost tvářených výrobků. Nevýhodou je vysoká vstupní investice. [12],[16]

## 1.4 Tavení

Tavení je proces, při kterém dochází k přechodu z pevného skupenství do kapalného a tento děj je dán teplotou tavení. V tavení se teplota ve vsázce nebude zvyšovat nad bod tavení, dokud nedojde k úplnému roztavení. V případě celkového roztavení vsázky a následném dodávání tepla, můžeme docílit až teploty varu. Každý materiál má jinou teplotu tavení, například teplota tavení železa je cca. 1500 °C, měď má 1100 °C podobně jako zlato. Tavení se využívá pro tvoření slitin a tím je možné získat lepší vlastnosti než by měly kovy samotné. Cílené přidávání materiálů se nazývá legování. Příkladem může být například výroba ocelí, u kterých můžeme požadovat různé vlastnosti. Jako směsi se k samotnému železu přidávají například mangan, chrom či molybden. Každý tento prvek přidává slitině určité specifické vlastnosti, jako zvýšení mechanické pevnosti, odolnost proti korozi, žárupevnost a chemická odolnost aj. [12], [14], [15]

## 1.5 Svařování

Jedná se o technologii při které vytvoříme trvalý a nerozebíratelný spoj, dvou a více součástí. Jelikož je velmi těžké dosáhnout spojení na úrovni meziatomových vazeb, proto je nutné při svařování působit buď tlakem, teplem nebo oběma faktory najednou. Obecně platí čím více tepla dodáme, tím méně tlaku je třeba a opačně. Svařovat můžeme jak kovové tak i nekovové materiál, materiály podobných i různých vlastností. Při svařování dochází ke změně fyzikálních či mechanických vlastností v okolí spoje spojovaného materiálu. Výhodou spojení svařováním je velká pevnost, životnost a těsnost. Nevýhodou je změna struktury a tím i změna mechanických vlastností v místě spoje. [27]

## 2 Elektrické ohřevy

### 2.1 Elektrotepelná zařízení odporová

#### 2.1.1 Přímý odporový ohřev

Jedná se o ohřev, u kterého teplo vzniká průchodem elektrického proudu vodivou pevnou vsázkou nebo elektricky vodivou tekutinou. Přímý odporový ohřev je definován Jouleovým zákonem. Vodičem o délce  $l$  prochází proud  $I$  po dobu  $t$  a díky tomu ve vodiči vzniká teplo  $Q$ .

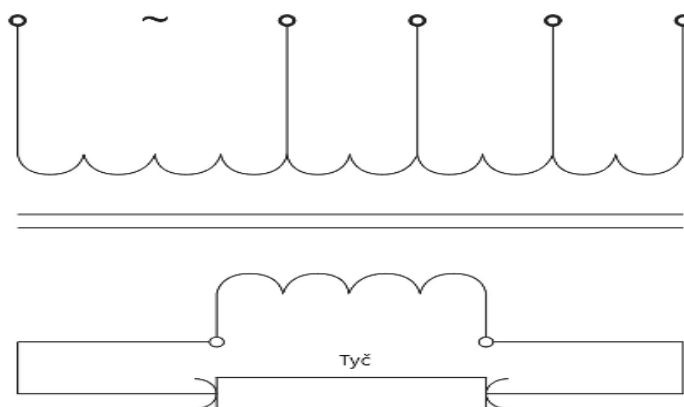
$$Q = R \cdot I^2 \cdot t = P \cdot t \text{ [J]} \quad (2.1)$$

Odpor vodiče je dán délkou vodiče jeho průřezem a vlastní rezistivitou materiálu :

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \text{ [\Omega]} \quad (2.2)$$

#### 2.1.2 Ohřev dlouhých kovových tyčí

Do tyče konstantního průřezu je z regulačního transformátoru kontakty zaváděn elektrický proud. Pro správný ohřev musí dojít k tomu, že délka ohřivané tyče musí být alespoň 10 krát větší než její samotný průměr. Kdyby toto neplatilo, došlo by k tomu, že tyč nebude rovnoměrně ohřívána po celé délce. Mezi výhody tohoto ohřevu patří rychlost a účinnost.



Obr. 2.1: Ohřev dlouhých kovových tyčí [1]

### 2.1.3 Elektrodové solné lázně

Jedná se, jak už název napovídá, o zařízení, které využívá elektrickou vodivost solné lázně. Do solné lázně jsou vloženy dvě elektrody, mezi kterými prochází elektrický proud. Používá se zejména pro ohřev ocelových součástí ke kalení, jako jsou ložiskové kuličky, kroužky nebo kuličková ložiska. Dá se však také použít pro tepelné zpracování barevných kovů nebo slitin. Dělí se na dva základní typy:

- První typ je ten, že proud prochází jak elektrolytem, tak i vsázkou ponořenou v elektrolytu. Příkon závisí na vsázce.
- Druhý typ je, když se vsázka vloží do solné lázně v místě, kde není elektrické pole a vsázkou tedy proud neprochází. Příkon na vsázce nezávisí.

Důležitým hlediskem při práci s elektrodovou solnou lázní jsou bezpečnostní předpisy. Při její práci vznikají plyny a díky nim musí docházet k dobrému odvětrávání. V dnešní době se pece používají pouze zřídka, jedná se spíše o historii. [1]

### 2.1.4 Nepřímý elektrický ohřev

Elektrická energie je přeměněna v teplo v tzv. topných člancích umístěných přímo v pecním prostoru. Teplo se do vsázky dostává převážně pomocí sálání článků a vyzdívky a prouděním atmosféry v prostoru peci. Zařízení využívající nepřímý elektrický ohřev jsou tzv. odporové pece a je možné je dělit podle několika hledisek. [2] [4]

a) Podle teploty v peci:

- nízkoteplotní do 600 °C,
- středoteplotní od 600 °C do 1 100 °C,
- vysokoteplotní nad 1100 °C.

b) Podle atmosféry v pracovním prostoru peci:

- s normální atmosférou,
  - s řízenou atmosférou,
  - pracující s vakuem.
- c) Podle pohybu vsázky při ohřevu:
- se stabilní neboli nepohybující se vsázkou,
  - s pohybující se vsázkou pracovním prostorem pece

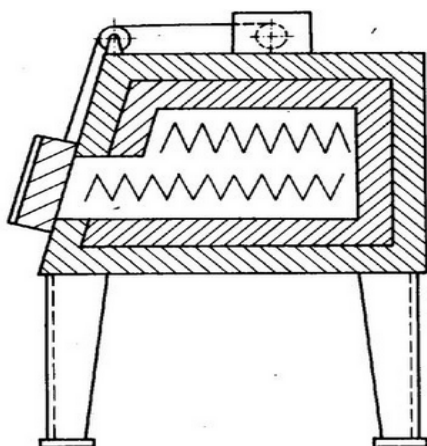
### 2.1.5 Odporové pece se stabilní vsázkou

Pece se stabilní vsázkou jsou jedny s nejběžnějších. Vsázka se během ohřevu nijak nepohybuje. Mezi tyto pece patří například pece komorové, šachtové, vozové, pokloповé neboli zvonové, elevátorové a kelímkové tavicí.

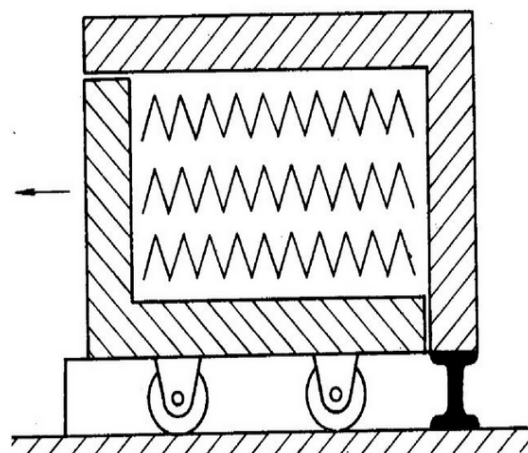
Pece komorové jsou nejstaršími typy odporových pecí. Topné články jsou umístěny obvykle na bocích, někdy mohou být i na podlaze či v zadní stěně ale i ve stropě. Topnými články lze docílit různé pracovní teploty. Výkon a teplota se regulují podle technologických požadavků různými regulačními systémy. Mezi jejich nespočetné výhody patří jejich univerzálnost. [1]

Vozové pece jsou větší komorové pece, u kterých je přední a spodní strana pohyblivá a může tedy vyjíždět a zajiždět do pece. Boky, stropní a zadní část jsou stabilní, tedy jsou nepohyblivé. Vsázka je mimo pec umístěna na vozovou konstrukci a poté je spolu s konstrukcí zasunuta do prostoru pece. [4]

Šachtové pece jsou nejčastěji s kruhovým nebo čtvercovým průřezem, jsou hlubinné a umístěny pod podlahou pracovního provozu. Vsázka je do pece vkládána jeřábem a topné články jsou chráněny před poškozením speciálními žárovzdornými vodítky. Pro zvýšení rychlosti ohřevu a rovnoměrnosti rozložení teploty se na dno pece umísťuje ventilátor. [4]



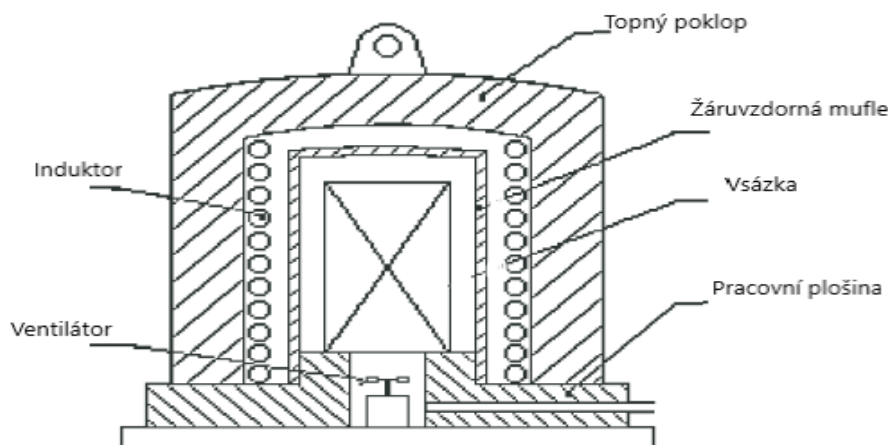
Obr. 2.2: Komorová pec [28]



Obr. 2.3: Vozová pec [28]

Pokloповé pece mají velmi dobře izolovaný topný poklop a na svém vnitřním povrchu topné vinutí. Proti přímému sálání topných článků, a proti lokálnímu přehřátí, je vsázka kryta žárupevnou muflí (poklopem). Řízená vhodná atmosféra se pomocí ventilátoru vede do prostoru žárupevné muflie a slouží k zlepšení rovnoměrnosti ohřevu. Muflie umožňuje ohřev i chladnutí v řízené atmosféře. Tyto pece jsou stavěny s výkony do několika set kilowattů. [3] [4]

Elevátorové pece jsou jedny z největších odporových pecí, které mají stabilní vsázku. Účinnost těchto pecí je velmi dobrá a konstruují se pro teploty do 1000 °C až 1200 °C s výkony od 500 kW až do 2 000 kW. Tato pec je velmi vhodná pro vsázku velkých rozměrů a velké hmotnosti. [4]



Obr. 2.4: Pokloповá pec [1]

Kelímkové odporové pece jsou konstruovány pro tavení kovů a slitin s nižší teplotou tavení. Sestávají z kovového nebo keramického tavicího kelímku, kolem kterého je topné



vinutí. Kostra pece a tepelná izolace jsou umístěny vně topení. Pece bývají konstruovány tak, aby byly sklopné k odlévání roztaveného kovu. [1]

### 2.1.6 Odporové pece průběžné

Jejich největší využití je při tepelném zpracování více výrobků. Tyto pece jsou dimenzovány většinou na nižší teploty a dle zvoleného technologického procesu lze provádět předepsaný ohřev, výdrž či chladnutí. Vsázka se v peci pohybuje různými způsoby.

Pásové pece jsou většinou automatická zařízení, u kterých se vsázka vkládá ručně nebo pomocí automatického podavače na dopravní pás. Dopravní pás procházející pecí je tvořen ze žárupevného drátu. Pece jsou určeny pro zpracování menších součástí do teploty 900 °C, přičemž je obvykle součástka ohřáta na teplotu kalení a následně se ochlazuje v kalicí lázni. [4]

Válečkové pece jsou obdobné pecím pásovým. Pohyb vsázky v peci probíhá na otáčejících se žárupevných válečkách. Vsázka je kladena přímo na válečky. Jsou stavěny pro teploty do 900 °C. [4]

Krokové pece jsou konstruovány k ohřevu velkých výkovků a odlitků. Pohyb vpřed je realizován pomocí kroků. Mechanismus realizující krok (pozdvihnutí a posunutí vsázky) je umístěn pod pecí, mimo pracovní prostor pece. Pohon je realizován buďto pomocí hydrauliky nebo elektromotorem. [1]

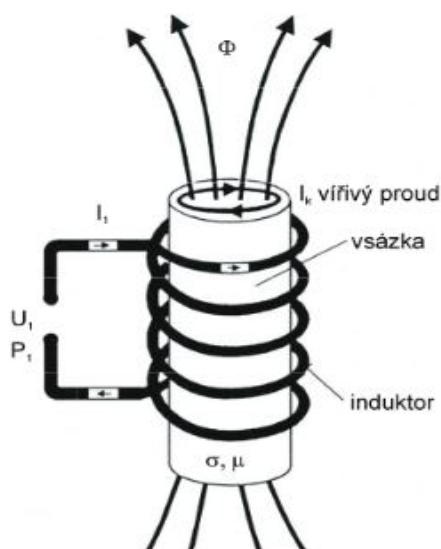
Protahovací pece jsou konstruovány pro ohřev drátů a pásů, u kterých dochází díky protahováním pracovním prostorem pece k rovnoměrnému prohřátí. [4]

### 2.1.7 Využití odporových pecí

- Žihání – využití odporového ohřevu pro snížení tvrdosti, zlepšení obrobitelnosti. Ocelové součásti se ohřejí na teplotu 700 °C a nechají se 2 hodiny při této teplotě, poté pomalu chladnou, uvnitř pecí. [1]
- Kalení – zvyšuje se tvrdost ocelových součástek.

## 2.2 Indukční elektrotepelná zařízení

Indukční zařízení sestává vždy z cívky (induktoru), vsázky a zdroje střídavého proudu. Jedná se v podstatě o vzduchový transformátor, kde cívka je primární strana transformátoru a vsázka sekundární stranou spojenou nakrátko. Prochází-li proud rovinným zářičem (induktorem) vzniká v jeho okolí elektromagnetické vlnění rovinné na rozdíl od válcového zářiče (induktoru), kde při průchodu střídavého proudu vzniká válcové elektromagnetické vlnění. Do vsázky, která se nachází uvnitř induktoru, se naindukuje napětí, které má za následek vznik vířivých proudů, které začnou vsázku zahřívat. Indukční ohřev lze realizovat pouze u elektricky vodivých vsázek. [1]



Obr. 2.5: Princip indukčního ohřevu [1]

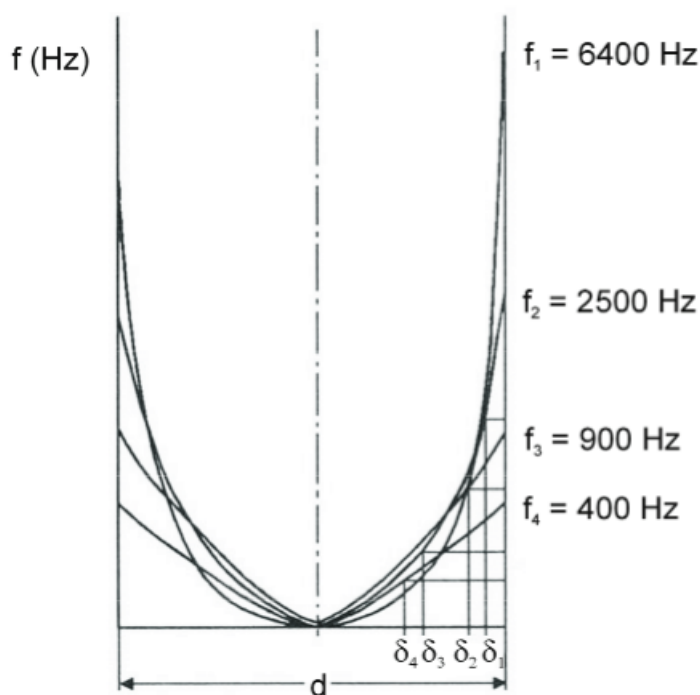
Největší výhodou celého systému je, že nejteplejším objektem celého indukčního zařízení je vsázka, která není s ničím mechanicky vázaná. Do vsázky je možno indukčním ohřevem indukovat vysoké měrné příkony a správnou volbou frekvence proudu v induktoru je možno řídit rozložení tepla uvnitř vsázky. Díky těmto výhodám je indukční ohřev jedním z nejrozšířenějších a nejpoužívanějších ohřevů. [1],[4],[6]

Elektrická účinnost je závislá na poměru celkového průměru vsázky, tedy její tloušťce a na hloubce vniku naindukovaných proudů ve vsázce. Dále mají na účinnost vliv ohříváný materiál a jeho teplota. [6]

Největší výhodou indukčního ohřevu je možnost ovlivnění rozložení tepla uvnitř vsázky. Hloubka pronikání elektromagnetického vlnění do vsázky se nazývá hloubka vniku a je určena následujícími vztahem:

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\gamma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi f\mu\gamma}} \quad (\text{cm, m}) \quad (2.1)$$

kde „a“ je „hloubka vniku“, „f“ je frekvence proudu v induktoru, „μ“ je permeabilita a „γ“ je konduktivita. Z rovnice je patrné, že jediný parametr, kterým lze hloubku vniku ovlivnit, je frekvence. [1],[6]



Obr. 2.6: Závislost hloubky vniku na kmitočtu [1]

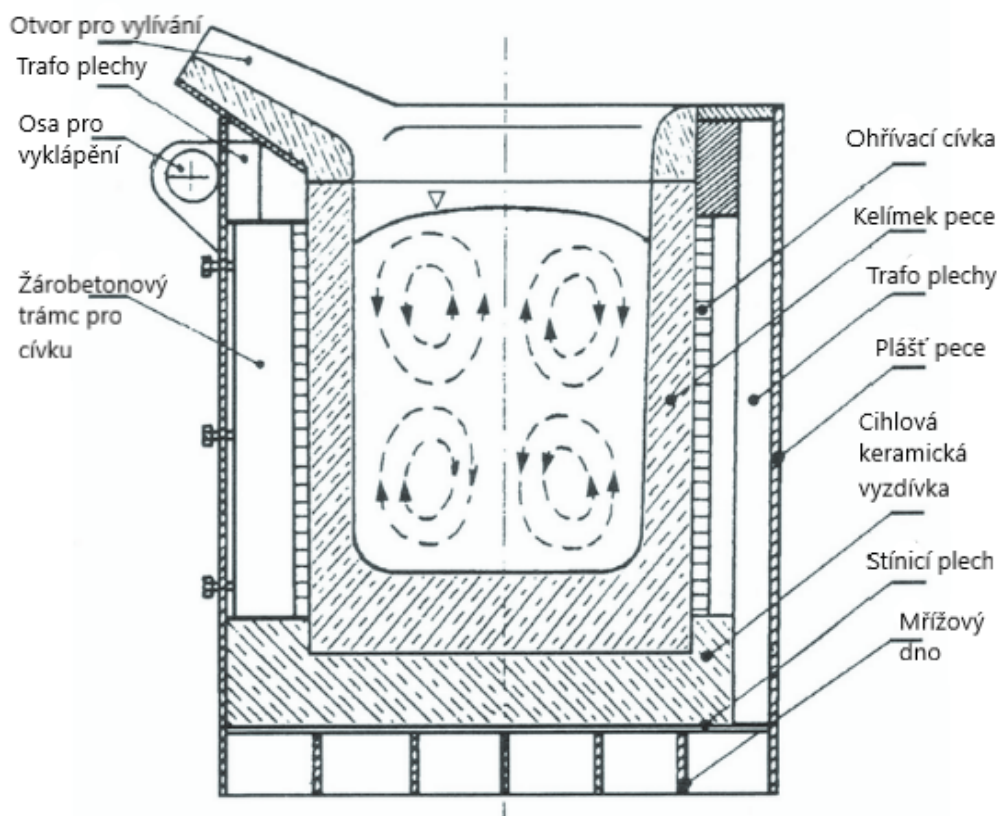
### 2.2.1 Druhy elektrických indukčních zařízení

- Zařízení pro připojení na síťovou frekvenci – jedná se o zařízení, která lze připojit na síť průmyslového proudu 50 Hz (event. 60 Hz).
- Středofrekvenční zařízení – zařízení je připojeno přes frekvenční měnič k síti. V dnešní době se používá připojení přes statické měniče kmitočtů. Tento měnič sestává z usměrňovače, meziobvodové tlumivky a střídače. Jedná se o zařízení pracující na frekvenci od 50 Hz do 50 kHz.

- Vysokofrekvenční zařízení – tato zařízení mají vysokofrekvenční transformátor a zbytek zařízení je velmi podobný středofrekvenčnímu zařízení. Tato zařízení pracují nad kmitočty 50 kHz.

## 2.2.2 Indukční kelímkové pece

Jedná se o zařízení určená převážně pro tavení nejrůznějších kovů a vyrábějí se v nich vysoce kvalitní oceli. Toto zařízení sestává z válcového keramického kelímku, kolem kterého je vinutý válcový induktor z dutého měděného vodiče, jehož dutinou protéká chladicí voda. Induktor vyzařuje magnetický tok, který se uzavírá vně cívky a z tohoto důvodu je nutné zvolit vhodné opatření, aby intenzita magnetického pole byla co nejmenší. Proto se pece opatřují stíněním buď z dobře elektricky vodivého materiálu (dural, měď), nebo ze svazku transformátorových plechů. Pokud by tohoto nebylo docíleno, došlo by k zahřívání nosných konstrukcí pece. Pec je většinou vyklápěcí. Induktor je připojen ohebnými měděnými lany a ke zdroji napájecí frekvence je 50 Hz až 10 kHz. Přenášený výkon z induktoru do vsázky je přímo úměrný kvadrátu proudu a odporu vsázky. Z tohoto důvodu je pec vhodná pro tavení materiálů s malou elektrickou vodivostí. Hloubka vniku



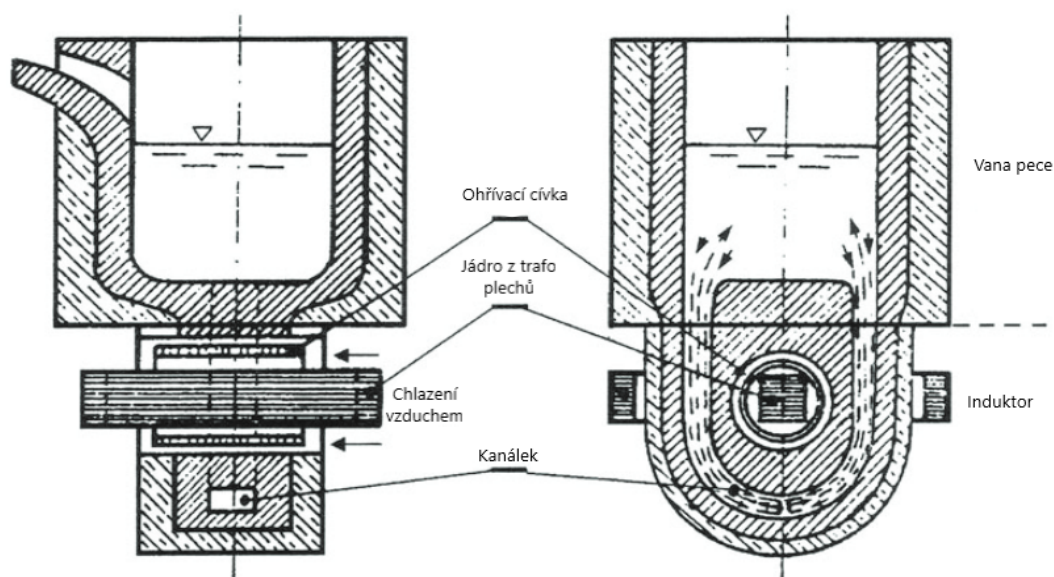
Obr. 2.7: Indukční kelímková pec [1]

elektromagnetického vlnění je při ohřevu dána hloubkou vniku a je závislá na velikosti frekvence. [2],[4],[7]

### 2.2.3 Indukční kanálkové pece

Pec sestává z pecní vany, do které se vkládá vsázka, poté z kanálku, který tvoří průchod pro roztavenou vsázku. Ohřívací cívka je umístěna v okolí kanálku a spolu s cívkou tvoří transformátor nakrátko. Cívka je chlazena vzduchem a je umístěna uprostřed jádra z elektrotechnických plechů. Ochlazování vzduchu je možné použít díky nižšímu magnetizačnímu proudu v ohřívací cívce. Promíchávání vsázky v peci je způsobeno elektrodynamickými silami vzniklými elektromagnetickými poli od cívky a vsázky v kanálku, která vznikají kolem kanálku v důsledku proudu uvnitř vsázky. Pole způsobuje tlak na kov v kanálku a v důsledku hydrostatického tlaku dochází k promíchávání roztavené vsázky v kanálku. Kov z vany je podél stěn vtahován do kanálku a poté je středem kanálku vytlačován zpět do vany.

Tyto pece jsou stavěny obvykle na síťovou frekvenci, z tohoto důvodu odpadá nutnost frekvenčního měniče. Nevýhodou při užití je nutnost přítomnosti roztavené vsázky uvnitř kanálku, což znamená, že se tavenina nikdy neodlévá celá, ale vždy se nějaké určité množství nechává za účelem udržení závitů nakrátko. Což znamená, často udržovat tuto pec v pracovní teplotě, aby nedošlo k jejímu vychladnutí.



Obr. 2.8: Kanálková pec [1]

Pec se využívá pro tavení barevných kovů, zušlechťování litiny a pro tavení velmi dobře vodivých materiálů. Během tavení materiálů, u kterých může dojít k oxidaci, jako je například hliník či měď a její slitiny, dochází k oxidaci a ke vzniku  $\text{Al}_2\text{O}_3$  případně  $\text{CuO}_3$ . Při usazování oxidů v kanálku dochází k zúžení průtokové cesty a tedy k zvýšení tlaku, kterým protéká vsázka. Z praktického hlediska je kanálek ve tvaru čtyř-hranu na jehož dně jsou umístěny čistící otvory. Účinnost kanálkové pece je vyšší než pece kelímkové.

#### 2.2.4 Využití indukčních zařízení v praxi

Kalení – induktor je tvarem přizpůsoben povrchu kaleného předmětu. Průchodem střídavého proudu induktorem se na povrchu kaleného předmětu indukuje střídavé magnetické pole a tím i vířivé proudy. Díky vlivům proudu dojde k ohřevu povrchu tělesa na kalící teplotu a rychlým ochlazením k zakalení. [6],[21]

Pájení – indukční pájení je proces, při kterém se snažíme spojit dva materiály vodivým materiálem s nižší tavicí teplotou. Induktorem prochází střídavý proud, který budí v pájeném materiálu vířivé proudy, které jsou zdrojem ohřevu na teplotu pájení. [1],[6]

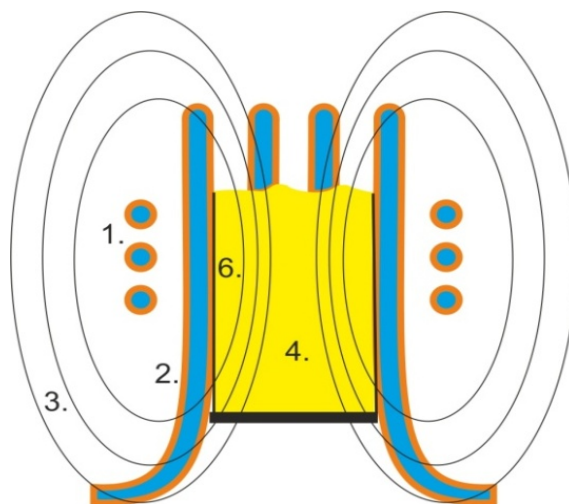
Svařování – při tomto svařování je nutné použít speciálně upravený induktor a lze tímto způsobem např. svařovat trubky. [6]

Tavení – využití indukčního tavení je možné při využití pecí kelímkových či kanálkových. Lze tedy tavit kovy, jako jsou například zinek, hliník, měď, ocel apod. Výhodou těchto pecí je schopnost připravit čistější kovy než například v pecích obloukových.[1],[6]

### 2.3 Studený kelímek

Jedná se o zařízení fungující na principu vysokofrekvenčního indukčního ohřevu sloužícího k tavení materiálů s vysokou teplotou tavení. Principiálně se jedná o indukční ohřev, u něhož je vsázka umístěna ve vlastní tavicí nádobě (studený „kelímek“), který je intenzivně chlazen. „Kelímek“ sestává z trubkovitých, většinou měděných dílů, kolem kterých je umístěn induktor generující elektromagnetické pole. Toto pole vytváří vířivé proudy, které zahřívají vsázku umístěnou v „kelímku“. Princip spočívá v soustředění zdroje tepla přímo dovnitř vsázky umístěné v tavicí nádobě, která je vnitřně chlazená. Z

tohoto plyne označení studený „kelímek“. Pracovní teplota samotného „kelímku“ bývá okolo 50 °C, přičemž teplota samotné roztavené vsázky může být až 3 000°C. Studený „kelímek“ má výhody indukčního ohřevu a jeho největší výhodou je bezvyzdívková konstrukce. Tento faktor zajišťuje, že roztavený materiál se nijak nedotýká stěn „kelímku“, ani jiného materiálu a díky tomu lze dosáhnout velmi vysoké čistoty. Z důvodu neustálého chlazení se na vnitřní straně „kelímku“ vytvoří miniaturní slabá krusta z taveného materiálu a z praktického hlediska nahrazuje nádobu. [23]



Obr. 2.9: Princip studeného kelímku [22]

Kde pod číslem 1. je induktor, 2 kelímek, 3 magnetické pole induktoru, 4 roztavená vsázka, 5. chladivo a 6 krusta.

### 2.3.1 Aplikace studeného kelímku

1. **Tavení** – tavení je to nejrozšířenější použití studeného kelímku. Tavit lze materiály elektricky vodivé i nevodivé. Při tavení vodivých materiálů se studený kelímek používá spíše pro špatně elektricky vodivé materiály. Případně je možné tavení žárupevných kovů a jejich slitin. Mezi nevodivé materiály, které lze studeným kelímkem tavit patří sklo či keramika a oxidy kovů. Nevýhodou těchto materiálů je jejich velmi nízká elektrická vodivost a z tohoto důvodu je nelze přímo indukčně ohřívat. Z tohoto důvodu dochází k problému při začátku tavby. Jedním způsobem tavení je přidání vhodného elektricky vodivého materiálu do vsázky, který se roztaví a vsázka se od ní začne ohřívat, stává se elektricky vodivou a indukčně se taví. [23]

V laboratořích Výzkumného centra Řež, v rámci projektu SUSEN se studený kelímeček používá ve výzkumu těžkovitělných kovů, poté pro simulaci nestandardních stavů jaderných reaktorů, jako jsou havárie reaktorů, případně možnost využití vitrifikace radioaktivního odpadu. [23]

## 2.4 Dielektrický ohřev

Elektrotepelná zařízení pracující na principu dielektrického ohřevu slouží k ohřívání elektricky nevodivých materiálů a polovodičů. Při těchto ohřevech se používá vysokofrekvenční elektromagnetické pole. Dielektrická zařízení jsou typově stejná jako zařízení indukční. Základy obou ohřevů vyplývají z Maxwellových rovnic. Další cennou vlastností obou ohřevů je vznik tepla přímo uvnitř vsázky. Avšak u indukčního zařízení využíváme magnetickou složku elektromagnetického vlnění, hlavní pracovním nástrojem pro ohřev je induktor (cívka) a uplatňuje se pro ohřev elektricky vodivých materiálů. Zatímco dielektrický ohřev uplatňuje převážně elektrickou složku elektromagnetického vlnění, hlavním pracovním nástrojem je kondenzátor a slouží pro ohřev špatně vodivých materiálů. [1],[4]

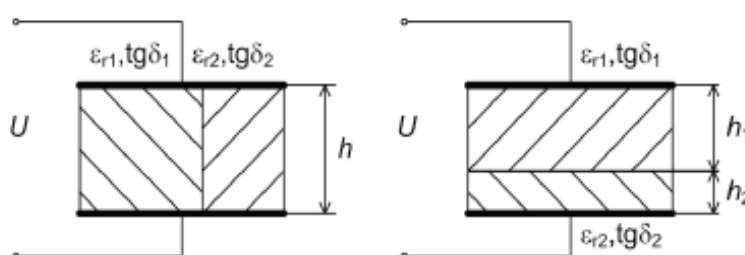
Jak tedy bylo již zmíněno pro dielektrický ohřev je hlavním pracovním prvkem kondenzátor. Uvažujeme-li tedy deskový kondenzátor, mezi jehož elektrodami je vakuum. Elektrody mají plochu  $S$  a jsou od sebe vzdálené délkou  $l$ . Jedna elektroda má kladný náboj  $+Q$  a druhá elektroda má stejný záporný náboj  $-Q$ . Při vložení izolačního materiálu mezi elektrody a přivedení napětí, dojde k vytvoření elektrického pole. Pole způsobí uspořádání částic uvnitř dielektrika tzv. polarizaci. Podle náboje a napětí, které jsou přivedeny na elektrody, dojde k uspořádání částic. Kladné částice k záporné elektrodě a záporné částice ke kladné elektrodě. Pohybem nosičů náboje v dielektriku, které jsou umístěny v elektrickém poli, vznikají dielektrické ztráty. V dielektriku si můžeme označit dva druhy nosičů. Prvním jsou volné nosiče náboje, jejichž pohyb po zániku pole ustává a nosiče se vrací do původní polohy. Druhým jsou vázané nosiče náboje, které souvisejí s polarizací a po zániku elektrického pole se vrací do původní polohy, avšak s určitým zpožděním. Veškeré pohyby částí způsobené elektrickým polem jsou spojeny se spotřebou energie a její přeměnou na tepelnou formu. Vzniklé teplo a jeho velikost je definováno dielektrickými ztrátami a dají se rozdělit na tři části. První jsou ztráty vodivostní,



způsobeny pohybem volných nosičů. Druhé jsou polarizační, ty souvisejí s vázanými náboji a dipóly a třetí jsou ionizační, které jsou výsledkem nárazové ionizace. [1], [2], [4]

### 2.4.1 Nesourodá dielektrika

Při praktickém využití dielektrického ohřevu musíme, často ohříváme materiály složené z více jak jednoho dielektrika. Pokud tedy budeme uvažovat ohřev dvou materiálů, které mají i jiné vlastnosti, tak mohou nastat dva případy. První, dielektrika jsou spojena příčně, tedy paralelně a druhý, dielektrika jsou spojena podélně, tedy sériově.



Obr. 2.10: Nesourodost dielektrik [1]

### 2.4.2 Aplikace dielektrického ohřevu

Dielektrický ohřev a jeho použití má výhodu v dosažení rovnoměrného a přesného prohřátí výrobku a tím se zvyšuje kvalita ohřevu. Technologie dielektrického ohřevu je vysokofrekvenční způsob ohřevu a je vybavena automatickým řídicím systémem. A další výhodou je možnost ohřevu daleko silnějších vrstev než u ohřevů ostatních. Dielektrický ohřev lze aplikovat pro:

- Výrobu překližek
- Sušení dřeva
- Svařování, předehřívání plastů
- Ohřev v potravinářském průmyslu

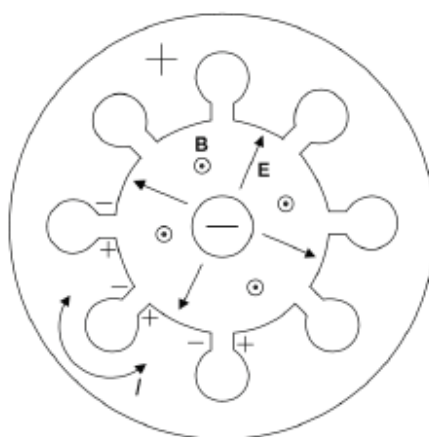
## 2.5 Mikrovlnný ohřev

Tato technologie využívá vysokofrekvenční techniku a využívá frekvenční pásma nad 1 GHz. Proto umožňuje ohřevy, které nebylo možné realizovat u ohřevu dielektrického. Mikrovlnný ohřev je zvláštním případem dielektrického ohřevu. Rozdílem mezi těmito ohřevy je využitá frekvence, u mikrovlnného ohřevu není možné využít pracovní kondenzátor a je nutné použít zdroj mikrovlnného záření. Teplo stejně jako u dielektrického ohřevu vzniká uvnitř dielektrika v důsledku polarizačních jevů. Energie vysokofrekvenčního pole se přenáší do materiálu prostřednictvím mikrovln. Vlivem vysoké využívané frekvence lze dosáhnout velkých výkonů bez nebezpečí elektrického průrazu vzduchu kolem dielektrického materiálu..

Mikrovlnné zařízení sestává ze zdroje mikrovlnného záření, vlnovodu, dutiny ve které je umístěna vsázka. Ze zdroje jsou mikrovlny vyzařovány do vlnovodu a jím jsou vedeny do dutiny, ve které se nachází vsázka. Vsázka je umístěna na podložce a je z materiálu (sklo, keramika), u kterého nedochází k zahřívání. Okolí vsázky je zhotovené z vodivého materiálu (hliník, nerezová ocel). Vlnovod má průřez nejčastěji kruhového, případně obdélníkového tvaru a jeho rozměry jsou dány vlnovou délkou vlnění. [1],[2]

### 2.5.1 Mikrovlnné zdroje záření

Z poznatků uvedených dříve vychází, že u mikrovlnného ohřevu je nutné použít zdroj mikrovlnného záření. Jako nejběžnější zdroj mikrovlnného záření je magnetron. Jedná se o speciální výkonovou elektronku, která je schopna měnit energii ze stejnosměrné, či



Obr. 2.11: Konstruktivní uspořádání magnetronu [1]

střídavé energie na energii vysokofrekvenční. Magnetron je tvořen masivní dutou měděnou anodou, v její dutině je umístěna žhavená katoda. Anodová elektroda má na svém vnitřním povrchu sudý počet kruhových otvorů. S katodovým prostorem jsou dutiny spojeny úzkými štěrbinami. Celý magnetron je vložen do silného magnetického pole vybuzeného silným permanentním magnetem případně elektromagnetem. [1],[4]

### 2.5.2 Aplikace mikrovlnného ohřevu

Největší výhodou ohřevu je vznik tepla uvnitř materiálu a tím je možné zajistit vyšší teploty uvnitř materiálu než na jeho povrchu. Tím je možné zajistit ohřátí v celém objemu a vysokou rovnoměrnost prohřátí vsázky. U materiálů obsahující vodu je důležité uvážit, změnu relativní permitivity  $\epsilon$ . Mezi další přednosti patří rychlost ohřevu a dávkování dodané tepelné energie. Při ohřívání výrobků lze využít obal, který nijak neomezuje působení elektromagnetických vln, jelikož nejsou závislé na tepelné vodivosti a tudíž je izolující vrstvy nijak neovlivňují. Ohřev je možné využívat pro ohřívání materiálů různého skupenství a ohřev je možný v různém prostředí (vakuum, přirozená či řízená atmosféra). Nejčastější využití mikrovlnného ohřevu je v potravinářství, farmaceutickém a chemickém průmyslu, při výrobě, sušení a vytvrzování keramiky atd. Nejširším uplatněním je však v potravinářském průmyslu pro ohřev, vaření či pečení pokrmů a nebo v chemickém průmyslu především pro vulkanizaci pryže, zpracování plastů či urychlování chemické reakce. [1]

## 2.6 Elektrické obloukové pece

Obloukové pece fungují na principu přeměny elektrické energie na teplo pomocí silných elektrických výbojů v hořícím oblouku v ionizovaném prostředí. Prostředím, ve kterém se vytváří oblouk, je například plyn, případně pára. Pokud vezmeme normální podmínky, jsou plyny nevodivé, vodivými se stávají až po ionizaci. Ionizace je stav, kdy dojde k rozštěpení atomu a molekul na ionty a elektrony. K ionizaci může dojít například pomocí záření, elektrickým polem a nebo vysokou teplotou. [2],[4]

### 2.6.1 Obloukové pece se stejnosměrným obloukem

Pec sestává ze dvou elektrod (anody, katody), které jsou připojeny přes rezistor ke zdroji stejnosměrného napětí. Základem je přiblížení elektrod na takovou vzdálenost, až se

elektrody dotknout, předejde se a po jejich oddálení dojde ke vzniku oblouku. Oddálením elektrod dojde k vytažení oblouku a oblouk hoří v ionizovaném prostředí. Oblouk vznikne při nažhavené katodě dotknutím obou elektrod. Vznik oblouku je možný i při studené anodě, jelikož teplota anody je méně důležitá než teplota katody, která hraje velkou roli. Kromě nažhavené katody je velmi důležité i určité napětí mezi elektrodami, toto napětí by mělo být kolem 15 V až 20 V a záviset na několika okolnostech, jako například na párách kovů. [4]

### 2.6.2 Obloukové pece se střídavým obloukem

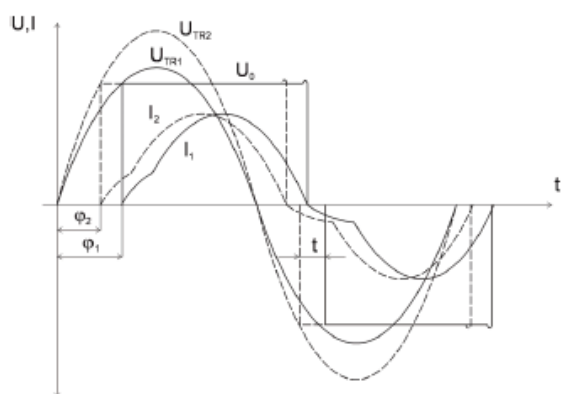
Vznik střídavého oblouku je v podstatě velmi podobný jako vznik oblouku stejnosměrného. Avšak změna polarity u stejnosměrného oblouku by znamenala zhasnutí oblouku. Při změně polarity, dojde ke změně polarity elektrod, v tomto případě pokud si nově vzniklá katoda udržela určitou teplotu dojde k opětovnému zapálení oblouku. Může nastat situace, kdy se na obou elektrodách při změně periody zachovávají žhavá místa, v tomto případě může dojít k udržení elektrického oblouku i při změně napětí periody. Z důvodu velké nestability střídavého elektrického oblouku je nutné využít tzv. stabilizačního členu. Podmínky pro hoření střídavého oblouku jsou :

- a) Nutnost žhavení obou elektrod
- b) Po změně polarity musí být zajištěno napětí pro případné znovu zapálení oblouku.

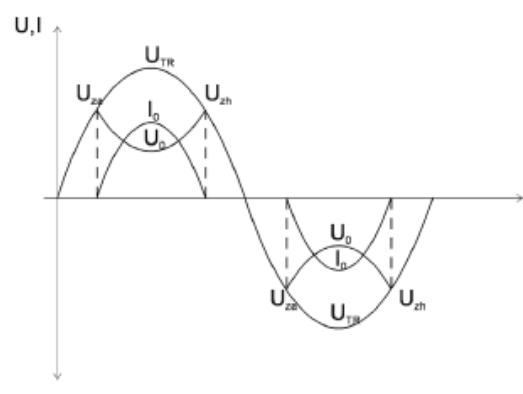
Aby tedy oblouk mohl hořet, musí zde být umístěný tzv. stabilizační člen. Jako stabilizační člen může být použitý rezistor, ten má však nevýhodu ve vzniklých ztrátách, proto se u střídavých pecí používá jako stabilizační člen indukčnost, která je zapojená v sérii s obloukem. Avšak důležitá podmínka je zachování účinníku  $\cos \varphi = 0,85$ , z tohoto důvodu je nutné zajistit správnou velikost indukčnosti. V případě zvýšení účinníku by došlo k poklesu doby hoření oblouku a v případě snížení účinníku by došlo ke zhoršení účinnosti oblouku. [1],[5],[6]

### 2.6.3 Rozdělení obloukových pecí podle způsobu hoření oblouku

Obloukové pece lze rozdělovat podle způsobu hoření oblouku na pece s přímým, nepřímým, se zakrytým a otevřeným obloukem.



Obr. 2.12: Průběh napětí a proudu se zapojenou indukčností [4]



Obr. 2.13: Průběh napětí a proudu v obvodu se zapojeným odporem [4]

- a) Pece s přímým elektrickým obloukem mají hořící oblouk mezi elektrodami a vsázkou. Přenos tepla do vsázky je přímý, tento způsob urychluje tavení. Proudový obvod se uzavírá přes taveninu. Tyto pece se nazývají také jako pece se závislým obloukem. Pece s přímým elektrickým obloukem se používají převážně pro výrobu oceli a litiny, [4],[5],[6]
- b) Pece s nepřímým elektrickým obloukem mají hořící oblouk mezi dvěma elektrodami a přenos tepla do lázně je nepřímý, způsoben sáláním. Hoření oblouku nijak nezávisí na vsázce. Z toho důvodu jsou tyto pece označovány jako pece se sálavým obloukem. Nejčastějším využitím pro tyto pece je tavení neželezných materiálů, šedé litiny, výroby ocelolitiny a tavení barevných kovů. [4],[6]
- c) Pece se zakrytým obloukem mají elektrody ponořeny do roztavené strusky a jsou obsypány zavázkou rud a příměsí. Oblouk se vytvoří, hoří mezi elektrodami a vsázkou a oblouk je zcela zakryt. Určitá část elektrického proudu prochází elektrodami, struskou a zavázkou, které jsou v horkém stavu vodivé. Díky tomu vzniká odporový ohřev strusky a zavázky přímým průchodem proudu. Z tohoto důvodu se tyto pece nazývají také jako oblouko-odporové pece. Problémem těchto pecí jsou elektrické přívody z důvodu toho, že pec pracuje s malým napětím a velkým proudem. Tyto pece jsou využívány k výrobě surového železa, feroslitin a materiálů, kde je potřeba dosáhnout vysokých teplot. [4],[5],[6]

## 2.7 Plazmová elektrotepelná zařízení

Zařízení pracující s plazmou jsou velmi podobná principu se zařízením obloukovým. Plazmová zařízení vytváří plazmu pomocí různých plazmotvorných plynů, na rozdíl od zařízení obloukových, kde vzniká plazma v oblouku za pomoci zejména výparů z elektrod a okolních plynů. Jako plazmový plyn se nejčastěji používá argon, dusík, vodík a nebo případně kyslík. Plazmu lze rozdělovat dle požité teploty na:

- Vysokoteplotní – teplota okolo  $10^5$  K až  $10^6$  K.
- Nízkoteplotní – teplota okolo  $10^3$  K až  $10^4$  K.

Pro elektrotepelná zařízení se využívá nízkoteplotní plasma a pro její vytvoření je možné použít dva způsoby:

- a) Bezelektrodové plazmové hořáky, neboli tzv. indukční. Je zde křemenná trubka, která je v dolní části chlazená a na níž je navlečený induktor. Seshora je do trubky přiváděn plazmový plyn a osově je zde zavedena ještě trubka, kterou je možné do plazmy přivádět technologický prášek. Zapalování plazmy je možné realizovat pomocí wolframové tyčinky, která je rozžhavena pomocí induktoru na vysokou teplotu a po zapálení plazmy je odebrána. Další možností je snížení tlaku plynu v oblasti induktoru a následným doutnavým výbojem dojde k postupnému zvyšování tlaku až dojde k plazmovému výboji. Výhodou je čistota plazmy, což je důležité pro některé chemické procesy a jeho nevýhodou je malá účinnost oproti elektrodovým hořákům [1],[2]
- b) Elektrodové plazmové hořáky, neboli pomocí elektrického výboje mezi elektrodami. Tyto hořáky lze dále rozdělit na hořáky se závislým obloukem a hořáky s nezávislým obloukem. Rozdíl je v generátoru u nezávislého oblouku, získává ionizovaný plyn energii ve výboji mezi katodou a anodou a poté horký plyn tryskou proudí ven z hořáku a již mu není dodávána žádná energie. U závislého oblouku v generátoru hoří pomocný oblouk mezi katodou a anodou při nižším napětí a hlavní oblouk hoří mezi katodou a ohřivanou vsázkou při vyšším napětí a proudu. [1],[2]

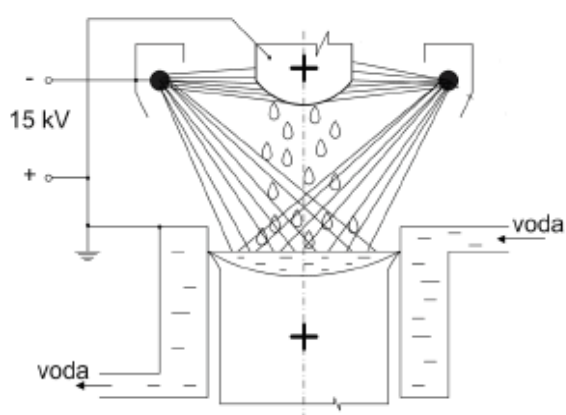
### 2.7.1 Aplikace plazmového ohřevu

- Svařování – plazmové svařování umožňuje svařování materiálů nejrůznějších vlastností a rozměrů. Proudění v oblouku se pohybují od 0,1 A až po 200 A u tloušťky materiálů od 0,1 mm až po 15 mm. Vzniká zde elektrický oblouk mezi elektrodou a materiálem, který však materiál neřeže, ale vytváří jakousi stínící obálku. [1],[2]
- Řezání – pro řezací proces je nutné zapálit slabší pilotní oblouk mezi tryskou a katodou prostřednictvím vysokého napětí a tím vytvořit částečnou ionizační dráhu mezi hořákem a obráběným materiálem. Při dotyku pilotního oblouku s materiálem dojde k automatickému zvýšení výkonu hlavního výkonu. Tento jev nebo také dotyk lze nazvat naříznutí, případně letný propich. Díky vysoké teplotě plazmatu téměř 30 000 K, plazma proudí až s nadzvukovou rychlostí ve směru obráběného materiálu. [1]
- Tavení – plazmové pece se převážně používají pro tavení, přetavování těžko tavitelných kovů za účelem zvýšení čistoty. V praxi jsou především rozšířené plazmové pece pracující na principu obloukových pecí. Zdrojem tepla v plazmových tavicích pecích je nízkoteplotní plazma, která je generována v plazmatronu. Plazmatron nahrazuje funkci elektrod, které nahličují vsázku, pracovní plyn vytváří neutrální ochranou atmosféru. Výhodou pecí jsou vysoké teploty a rychlosti plazmatu, vysoká koncentrace tepelného výkonu v plazmatu, jednoduchá regulovatelnost a hlavně vysoká čistota plazmatu. [1]
- Úprava materiálu – plazmatem lze upravit povrch materiálu na molekulární úrovni, což znamená možnost snadné vazby s jinými látkami. Díky těmto vlastnostem lze změnit nebo popřípadě zlepšit některé vlastnosti. Tato schopnost ovlivňovat vlastnosti povrchů vychází z vysoké energie elektronů, které jsou schopny přetrhat chemické vazby. [2]

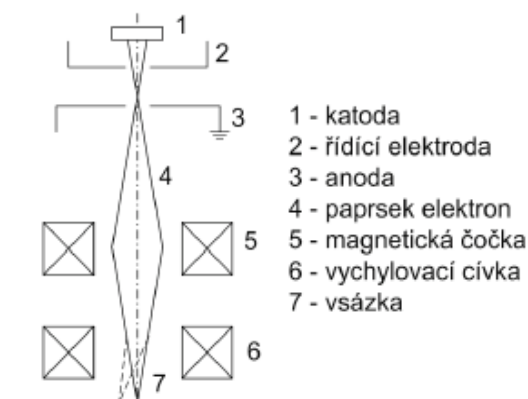
## 2.8 Elektronová zařízení

Elektronový ohřev se dá analogicky přirovnat k plazmovému ohřevu. Rozdílem je funkce proudu plazmatu generovaného v plazmatronu, která je nahrazena elektronovým paprskem. Jedná se tedy o svazek elektronů s velkou kinetickou energií. Tento paprsek je generovaný v elektronovém generátoru tzv. elektronovém dělu ve vakuovém prostředí, aby nedocházelo k brzdění dopadajících elektronů. Elektronové dělo zajišťuje generaci, urychlení a zaostření elektronů. V praxi vyžadujeme od elektronového zdroje koherentní svazek elektronů vycházející z bodového zdroje. Díky tomu elektrony získají stejnou energii a dokonce by se měla jejich průvodní vlna nacházet ve stejné fázi. Samotný elektronový paprsek je tvořen volnými elektrony a k jeho vytvoření se používá termoemísni zdroj. Mezi termoemísni zdroje můžeme označit katodu žhavenou elektrickým proudem. Nejvyšší použitelná teplota je dána požadavky na životnost katody omezovanou odpařováním. Elektronový paprsek není vytvořen pouze žhavenou katodou, a proto je nutné mu dodat kinetickou energii. Tím docílíme, aby svazek elektronů byl co nejmenšího průměru. Umožnění odklonění paprsku od své přímé dráhy a tak změnit místo dopadu, lze docílit působením doplňkového magnetického pole. Těchto důležitých vlastností je možné docílit vhodným tvarem urychlujícího elektrického pole. Správný tvar elektrického pole je možné správným tvarem elektrod. [1],[2]

Důležité při konstrukci trysky je nutnost zaručení dostatečného odstínění rentgenového záření, které vzniká při změně rychlosti elektronů, hlavně v místech dopadu elektronů na povrch předmětu.



Obr. 2.14: Systém prstencové katody [1]



Obr. 2.15: Axiální dělo [1]



Elektronová děla jsou konstruována dle tvaru a způsobu uspořádání elektrodového systému. Díky těmto uspořádáním lze rozlišit následující elektronová děla:

- S axiálním systémem
- Se systémem prstencové katody
- S příčným elektronovým paprskem

### 2.8.1 Aplikace elektronového ohřevu

Elektronové procesy lze z technologického hlediska rozdělit na:

- Termické procesy – jedná se o tavení těžkovitných kovů nebo chemických aktivních materiálů, dále o svařování, řezání, pájení atd.
- Netermické procesy – při těchto procesech paprsek vyvolává v materiálu chemickou reakci. Mezi tyto procesy patří litografické technologie, které se v elektrotechnice používají při výrobě čipů. Díky tomu lze vytvořit až 200 000 strukturních detailů na čipu.

Mezi největší výhody elektronových pecí můžeme označit možnost regulace teploty taveniny a proces tavení může být trvale opticky sledován. Jako nevýhody lze zmínit zvýšené vypařování kovů, jejich nízkou tepelnou účinnost navzdory vysoké měrné spotřebě energie a složitější konstrukce i provoz zařízení. [2],[6]

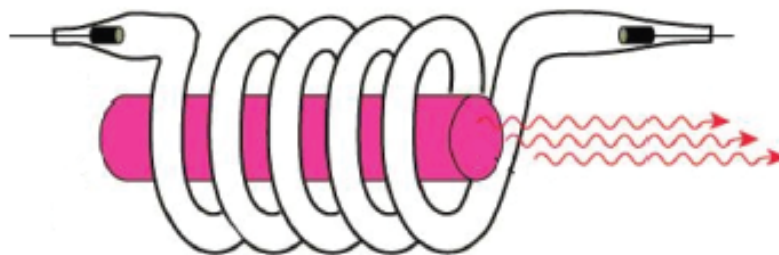
## 2.9 Laserové elektrotepelné zařízení

Laser je generátor přísně monochromatického, velmi intenzivního a prostorově omezeného svazku světelných paprsků a jedná se o koherentní světlo. Samotný laser má vysokou zářivost a malou divergenci (rozbíhavost) světelného svazku. Veškeré lasery pracují na principu stimulované emise elektromagnetického záření a jsou to zdroje s vysokým výkonem. Vysoký výkon je pro laser velmi důležitý z důvodu dosažení stimulované emise. [2]

### 2.9.1 Typy laseru

Všechny zmiňované lasery pracují na stejném principu a tím je stimulovaná emise, avšak liší se v konstrukci a ve vlastnostech. Lasery lze dělit podle použitého aktivního prostředí:

1. Pevnolátkové – jedná se o lasery například rubínové, které byly jedním z prvních pevnolátkových laserů. Aktivním prostředím je mono-krytal rubínu generující koherentní záření, avšak mezi nejrozšířenější lasery v současné době patří laser Nd:YAG. U něj je aktivním prostředím krystal Nd:YAG generující záření za pokojové teploty v infračerveném spektru. [1]



Obr. 2.16: Schéma rubínového laseru [1]

2. Plynové - aktivní prostředí plynových laseru je v plynném stavu. Inverze se dosáhne mezi energetickými hladinami některých složek plynu jako například atomů, iontů nebo molekul. První laser byl vytvořen z He-Ne (helium-neonu) a aktivním prostředím zde byly vybuzené aktivní atomy neonu. Dnes nejpoužívanější plynový laser je molekulární plynový laser založený na CO<sub>2</sub>, jehož aktivním prostředím je směs CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> a He. Při tlaku několika kilopascalu laser generuje infračervené záření. Účinnost tohoto laseru je jedna z nejvyšších, bývá okolo 10 – 15 %. [1], [2]
3. Polovodičové – princip je založen na vzniku stimulované emise optického záření v polovodičích při kvantových přechodech elektronů z vodivostního do valenčního energetického pásu. Podstatou je světlo emitující dioda, u které v přechodu PN vzniká při průchodu proudu v propustném směru luminiscence (spontánní emise). Nejpoužívanějším polovodičovým laserem je laser s dvojitou heterostrukturou,

jejímž základem je ternární polovodič (tvořen třemi materiály GaAlAs). Typický výkon polovodičových laseru je v řádu jednotek miliwattů při nepřetržitém provozu při pokojové teplotě. [1]

4. Kapalinové – jedná se o lasery s organickými barvivy.

### 2.9.2 Aplikace laseru

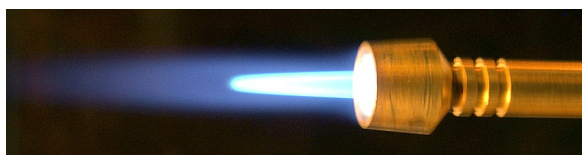
Jednou z nejpodstatnějších výhod je možnost s vysokou přesností opracovávat kovové i nekovové materiály a další předností je možnost opracování bez mechanického kontaktu s materiálem a schopnost opracování i obtížně přístupných míst.

- Řezání – nejčastěji využívané CO<sub>2</sub> lasery, které při řezání materiálu materiál taví a z řezu jej odfukuje proud plynu. Při řezání nevzniká téměř žádný odpad a velkou výhodou je vysoká přesnost při řezání a možnost řezání i křehkého materiálu. Při řezání nekovových materiálů se do místa řezu přivádějí inertní plyny a při řezání kovových materiálů se do místa řezu přivádí reaktivní plyny. [1]
- Svařování – nejčastěji se používá Nd:YAG laser a dochází zde k roztavení materiálu do požadované hloubky. Na rozdíl od ostatních technologií má laserové svařování řadu výhod. Mezi ně patří bezkontaktnost, lokální ohřev a schopnost ohřevu různých materiálů. [2]
- Kalení – využívá se laseru CO<sub>2</sub> a dochází ke zlepšení mechanických a fyzikálních vlastností. Největší předností je možnost lokálního tepelného zpracování i v místech, u kterých nelze použít jiný druh ohřevu. Nevýhodou je však vysoká pořizovací cena a malá energetická účinnost. Tímto způsobem lze ohřát povrchovou vrstvu do hloubky několika desetin milimetrů. [1]
- Opracování skel – jedná se o dekorační opracování skel pomocí laseru CO<sub>2</sub>.

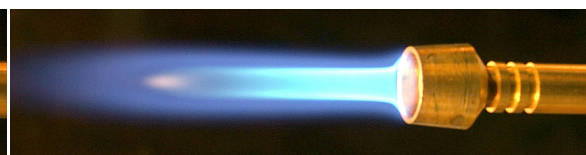
### 3 Nekonvenční ohřevy

#### 3.1 Ohřevy plamenem

Ohřev plamenem je nejstarším používaným tepelným procesem. Jedná se o zahřívání vsázky pomocí hořáku, ze kterého proudí plamen. Jako palivo se zde používají uhlovodíky, jako acetylén, metan, etylén nebo propan, případně tuhá paliva, jako jsou například koks nebo uhlí a nebo případně kapalná paliva, jako nafta, ropa či benzín. Při použití tuhých paliv musíme vzít v úvahu, že se jedná o špinavý provoz, kapalná paliva mají oproti tuhým palivům čistý provoz, jednodušší udržení teploty a jednoduchou obsluhu. Jednou z největších nevýhod využití kapalných paliv je omezené a stále ubývající množství ropy. Z tohoto důvodu se dosti často používají plynná paliva, která mají výhodu jak čistého provozu, tak i daleko levnější dopravu a přesnost regulací teploty. Avšak nejdůležitějším kritériem pro výběr paliva je efektivita paliva a jeho výhřevnost. Hodnoty výhřevnosti jednotlivých paliv jsou udány orientačně na obr. 15, jelikož je zde více faktorů, které výhřevnost ovlivňují. U plynových pecí teplota a intenzita plamene nezávisí pouze na zvoleném palivu, ale především na poměru použitého kyslíku. Svařování a tavení plamenem jsou nejpoužívanější způsoby využití. Svařování se používá pro nelegované oceli, plechy malých tlouštěk do 4 mm, nebo svařování trubek [25],[26]



Obr. 3.1: Kyslíkovo-butanový plamen s přebytkem kyslíku



Obr. 3.3: Kyslíkovo-butanový plamen s přebytkem butanu

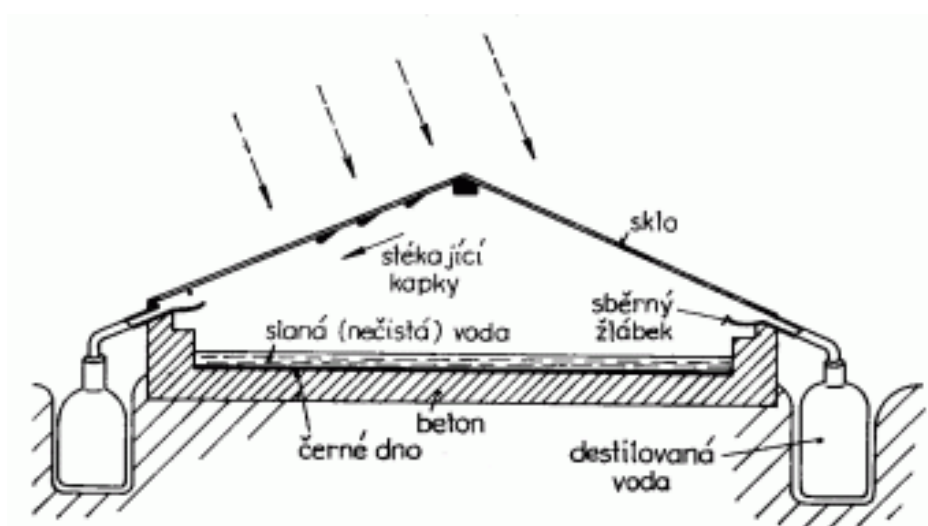
Palivo	Výhřevnost [kJ/kg]
Vodík	119 550
Methan	50 009
Ethan	47 794
Propan	46 357
Butan	45 752
Etanol	28 865
Smrk	13100
Jedle	14000
Borovice	13600
Hnědé uhlí	10 000 - 17 000
Černé uhlí	21 000 - 31 000
Koks	30 000

Obr. 3.2: Palivová výhřevnost

### 3.2 Ohřev za pomoci slunečního záření

Jedná se o další neelektrický způsob ohřevu. V dnešní době je celá řada průmyslových tepelných procesů řazena do tzv. nízkoteplotní úrovně do 100 °C. V těchto průmyslových oblastech lze využít jako jedno z originálních řešení, sluneční kolektory. Důležité je, že toto řešení nelze použít naprosto všude a je omezené místními podmínkami. Ve všech tepelných procesech se jedná o teploty kolem 30 °C - 200 °C. Tato technologie využití je vhodná pro:

- Mytí a sušení – jedná se o využití v potravinářském či textilním průmyslu, jako například, prádelny a myčky. V případě sušení jsou možnosti dvě, buďto se vzduch ohřeje přímou sluneční energií nebo od vody ve výměnících.
- Pasterizaci a sterilizaci – využití převážně v potravinářském a biochemickém průmyslu
- Destilaci, případně různé chemické procesy – pro využití sluneční energie k destilaci, například slané vody, se používá bazén, který má černé dno a je zakrytý sklem viz. obr 3.4. [10]



Obr. 3.4: Odsolování mořské vody

## 4 Porovnání elektrických a neelektrických tepelných procesů

Ať už se jedná o ohřevy konvenční či ohřevy nekonvenční, tak musím konstatovat, že každé tepelné zařízení je vhodné pro jiný druh materiálu, jiný druh tepelné technologie a také na různé tvary materiálů. V případě, že budeme porovnávat perspektivu jednotlivých tepelných ohřevů z pohledu jednotlivých tepelných procesů, je nutné vzít v úvahu, o jaký proces se bude jednat. V případě kalení lze jako nejperspektivnější elektrotepelný proces použít indukční ohřev, pro konstrukce jednodušších tvarů, u kterých lze induktor přizpůsobit tvaru vsázky. U složitějších tvarů se nám již indukční ohřev nevyplatí, z důvodu nutnosti přizpůsobení induktoru tvaru vsázky. Z tohoto důvodu je nutné používat například klasický ohřev plamenem, kterým se lze dostat do míst, kam se induktorem nelze dostat a nebo by bylo náročné induktor do tohoto tvaru vytvarovat. V případě kalení menších plošek je zase výhodnější použít laserový případně elektronový ohřev. V těchto situacích jsou místo indukčního ohřevu, u kterého by musel být malý induktor a nebo ohřev plamenem, použity právě tyto dvě elektrotepelné metody.

Při svařování si musíme uvědomit, jaký materiál budeme svařovat, jestli se jedná o materiál kovový nebo nekovový. Svařování můžeme, jako takové, dělit podle dvou hledisek na svařování tavné a na svařování tlakem. Při rozhodování, který typ svařování budeme volit, musíme vzít v úvahu místo, kde bude svařování prováděno a také co bude potřeba svařit, tudíž materiál. Svařování tavné rozdělíme podle použité technologie. Při použití elektrické technologie obloukového svařování je možnost využití stejnosměrného či střídavého proudu. Zdroj se střídavým proudem má mnohem vyšší účinnost než zdroj stejnosměrný a používá se pro svařování barevných kovů a litin. Svařování ohněm se využije spíše pro nelegované oceli a nebo pro svařování trubek. V případě svařování plastů můžeme využít dielektrický ohřev. Výjimečný druh svařování je svařování pomocí elektronového paprsku. Tento druh se používá pro obtížně svařitelné materiály. Největší výhodou je ovšem vytvoření metalurgicky čistého svaru bez trhlinek. Využití je v letectví, vesmírném výzkumu, či ve zdravotnictví. Svařování za pomoci tlaku je buďto za studena nebo ultrazvukem. V případě svařování za studena je nutné přiblížení povrchů svařovaných těles na vzdálenost atomů za neustálého tlaku. U svařování ultrazvukem využíváme mechanické rozkmitání o vysoké frekvenci při působení tlakové síly. Ultrazvukové

svařování našlo své uplatnění převážně při svařování plastů, avšak je možné jej použít i pro svařování více-žilových kabelových svazků.

Z technologického hlediska lze řezání provádět několika způsoby, ať už tepelnými nebo mechanickými. Mezi tepelné lze přiřadit řezání plamenem, u kterého se například využívá směs acetylen-kyslíkového plamene. Tato metoda se používá při řezání materiálů o velkých tloušťkách. Jako elektrotepelný zdroj lze použít plazmový a laserový ohřev. Plazmové řezání použijeme u vysoko-legovaných ocelí a laserový ohřev lze použít u křehkých materiálů a jeho největší výhodou je, že nevzniká žádný odpad.

Žihání je jedním ze základních druhů tepelného zpracování, které se provádí za účelem zlepšení určitých povrchových vlastností a odstranění účinků po tepelných zpracování jako je kalení či tváření. Žihací teplota je závislá na materiálu a způsobu žihání a pohybuje se od 500 °C do 1200 °C. Pro tento způsob se nejvíce hodí odporové pece, ve kterých lze dosáhnout stabilního prohřátí, udržení teploty při žihání a zajištění pomalého chlazení.

Tavení je proces, při kterém dojde k roztavení materiálu. Pro tento proces se používají tavicí pece, které mohou být buďto indukční, odporové, obloukové, za pomoci plamene a nebo za pomoci studeného kelímku.

## 5 Perspektiva jednotlivých procesů

Z mého pohledu je nutné se nejdříve zamyslet nad tím, že každým rokem přibývá dalších a dalších průmyslových výroben. To znamená, že se neustále zlepšují a vyvíjejí nové technologie, které slouží k zlepšení hospodárnosti a efektivnosti. Navíc dochází velmi často k nahrazování palivových ohřevů ohřevy elektrickými a to z důvodu zvýšení účinnosti a snížení vzniklých ztrát. Jak již bylo zmíněno, každý tepelný proces má své možné využití a použití.

U elektrotepelných technologií, je podle mě nejperspektivnější využití studeného kelímku. Touto technologií se zabývá mnoho pracovišť po celém světě a snaží se jej využít pro mnohé aplikace. Jedním z českých pracovišť, kde se zabývají využitím studeného kelímku je výzkumné centrum Řež. Tato instituce se zabývá využitím studeného kelímku pro modelování procesů vitrifikace radioaktivního odpadu a k jeho následnému uložení. Perspektivním zařízením je vzhledem k využití sluneční energie pro destilaci slané vody v přímořských oblastech. Vzhledem k velmi vysokým investičním nákladům, se tato technologie používá spíše v zemích, kde je vody nedostatek a tato technologie je zde jedinou možností a nebo případně nejlevnější možností. Další perspektivní metodou je výroba krystalů z oxidu zirkoničitého, technologií tavení ve studeném kelímku, které mohou být využity pro výrobu chirurgických nástrojů.

Z pohledu svařování bych viděl perspektivu ve vysokofrekvenčním dielektrickém svařování které je vhodné pro svařování termoplastů a také v technologii elektronového svařování, které díky čistotě je používána v oblasti kosmonautiky, případně jaderné energetiky. Technologie vysokofrekvenčního dielektrického svařování je nejčastěji používána pro svařování PVC, které díky svým vlastnostem patří mezi nejuniverzálnějších materiály. Z důvodu jeho vlastností se technologie používá pro výrobu pevných krycích potahů.

Z dnešního ekonomického a ekologického hlediska dochází k neustálému zlepšování nejen výrobních ale také recyklačních technologií. [20], [23], [24]



## 6 Hodnocení elektrotepelných technologií kriteriem 3E

Hodnocení 3E určuje kritéria pro energetické, ekonomické a ekologické hodnocení technologie i zařízení. Z hlediska poznatků, které jsem získal na základě psaní své bakalářské práce, bych tato jednotlivá hlediska použil při hodnocení uvedených elektrotepelných technologií.

- a) Hledisko energetické – Hodnocení energetické lze vzít z pohledu účinnosti a efektivnosti paliva a možnosti dlouhodobé udržitelnosti paliva. V případě, že budu hodnotit palivový ohřev, je možné zjistit výhřevnost jednotlivých druhů paliv, jak jsem již v tabulce výhřevnost jednotlivých paliv na straně 37 uvedl. Největší nevýhodou je ovšem dostupnost paliv, jelikož většina používaných paliv jsou ze zdrojů neobnovitelných. Elektrické ohřevy jsou oproti palivovým s energetickou bilancí na tom mnohem lépe, už jen z důvodu účinnosti, která je u elektrických ohřevů daleko vyšší, tak i z důvodu paliva, kterým je zde elektrická energie. Nejlepší energetickou bilancí mají, dle mého hodnocení, indukční ohřevy, které mají výhodu nejen ve vysoké účinnosti, ale i v rychlosti ohřevu, snadném řízení teploty a hlavně přesném určení místa ohřevu. Pokud by se vzala v úvahu výroba elektrické energie či tepelné energie za pomoci plynu, byla by tato možnost výhodná jak z hlediska účinnosti, tak z hlediska ceny.
- b) Hledisko ekonomické – Z toho hlediska je nutné se zamyslet nad investičními náklady a nad náklady na provoz. Investiční náklady u většiny elektrických ohřevů vycházejí vyšší než u nákladů palivových. Ovšem z pohledu nákladů provozních se jeví palivový ohřev jako mnohem nákladnější, ať už z důvodu nutnosti dovozu paliva, tak i z jeho následovného uskladnění, případného sušení. Elektrický ohřev, má ovšem jako provozní náklady pouze spotřebovanou elektrickou energii. Při tomto hodnocení, i přes své vyšší investiční náklady, se mi zdají ekonomičtější elektrické ohřevy,
- c) Hledisko ekologické – Z tohoto hlediska je nutné si uvědomit, že jak ohřev elektrický tak ohřev palivový, mají na svém začátku spalování. U palivového ohřevu spalováním vzniká přímo technologické teplo, u elektrického ohřevu se nejdříve

vyrábí elektrická energie a poté přeměnou elektrické energie vzniká technologické teplo. Při spalování vznikají škodlivé emise (plyny), které poškozují životní i pracovní prostředí. Snížení škodlivosti plynů, které unikají do ovzduší se provádí pomocí filtrů. Z jiného pohledu můžeme provoz rozdělit na provoz ve kterém se spalují plynná paliva a na provoz ve kterém se spalují paliva tuhá. V případě plyných paliv se jedná o čistý provoz a u paliv tuhých je to přesný opak. Jednou z výjimek je ovšem průmyslové použití sluneční energie, u které nevznikají žádné škodlivé plyny jako u ostatních ohřevů.

## Závěr

Předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval podle zadání. Pro dodržení zadaných bodů a určité struktury, jsem práci rozdělil na šest kapitol. V první kapitole jsem přiblížil hlavní tepelné procesy – kalení, žíhání, tavení, tváření za tepla i za studena a svařování. Popsal jsem jejich základní vlastnosti, jejich přednosti a přibližnou provozní teplotu. V dalších kapitolách práce jsem zmínil konkrétní příklady elektrických i neelektrických technologií a jejich použití pro tyto procesy.

Ve druhé a nejrozsáhlejší kapitole předkládané práce jsem na základě získaných poznatků z předmětů absolvovaných během studia, konzultací a odborné literatury přehledně uvedl elektrotepelné technologie. Popsal jsem základní principy všech technologií a uvedl jsem jejich využití pro praxi.

Třetí kapitolu jsem využil pro popsaní neelektrických technologií sloužících pro výrobu technologického tepla. Jako první jsem se zmínil o získávání technologického tepla za pomoci spalování paliv v tuhém stavu. Těmi jsou například koks či uhlí, v kapalném stavu ropa a v plynném stavu zemní plyn, methan, etylén případně propan. Dále jsem popsal využití sluneční energie, kde jsem se zmínil především o použití pro destilaci slané vody.

Ve čtvrté kapitole jsem nastínil cíl mé bakalářské práce a tedy přednosti elektrotepelných technologií. Ať už jde o elektrické, případně neelektrické metody je důležité si uvědomit, jaký druh materiálů budeme tepelně zpracovávat a o jaký průmyslový proces se bude jednat. Provedl jsem zde porovnání mezi elektrickými a neelektrickými technologiemi. Zmínil jsem jejich základní výhody a nevýhody a z důvodu různých materiálů a různých procesů jsem porovnání neprovedl pouze z pohledu výhod a nevýhod, ale i z pohledu zvoleného technologického procesu.

Na závěr v páté a šesté kapitole jsem dokončil cíl mé práce, tím že jsem zhodnotil perspektivu elektrických a neelektrických technologií a zhodnotil je kritériem 3E. Nejperspektivnější technologií v oblasti tavení materiálů vnímám studený kelímek, který však neslouží pouze pro tavení, ale i pro simulaci nestandardních stavů jaderných reaktorů

a do budoucna se pracuje na možnosti zpracování radioaktivního paliva. Další velmi zajímavou a perspektivní technologií je vysokofrekvenční svařování termoplastů, případně elektronové svařování, které díky své vysoké čistotě má velkou perspektivu v oblasti kosmonautiky případně jaderné energetiky.

Z mé bakalářské práce vyplývá, že oblast elektrotepelných technologií není ještě úplně probádaná a v budoucnu bude docházet, díky novým technologiím, i k zlepšování všech technologií a případnému objevování nových technologií.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. 2011. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [2] VON STARCK, Axel a Afred MÜHLBAUER, KRAMER, Carl, ed. *Handbook of Thermoprocessing Technologies*. 1. Huyssealle 52-56, D45128 Essen, Fed. Rep. of Germany: Vulkan Verlag, 2005. ISBN 3-8027-2933-1.
- [3] LANGER, Emil. *Teorie indukčního a dielektrického tepla*. 2. Praha: Československá akademie věd, 1979.
- [4] RADA, Josef a KOLEKTIV. *Elektrotepelná technika*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985.
- [5] DEJL, Jaromír; WÜNSCHE, Edgar.: *Elektrické obloukové pece*. Praha: SNTL, 1964. 208s.
- [6] ROT, David. *Vedení \_prodeni\_salani\_2019* [online prezentace]. 2019 [cit. 19.02.2020]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/portal/studium/courseware/kee/zetp/studijni-materialy.html>
- [7] ČERNÝ, Václav. Indukční ohřev (3): Repetitorium. *Odbornecasopisy* [online]. FCC Public, 2002, 2002 [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/indukcni-ohrev-3--14655>
- [8] Povrchové kalení. *TumliKOVO* [online]. TumliKOVO, 2010 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/povrchove-kaleni/>
- [9] Proces žihání. *TumliKOVO* [online]. TumliKOVO, 2010 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/proces-zihani/#more-2497>
- [10] MATUŠKA, Tomáš. Solární soustavy pro průmyslové aplikace. *Oze.tzb* [online]. TZB-info [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/144-solarni-soustavy-pro-prumyslove-aplikace>
- [11] Žihání (metalurgie). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Žihání\\_\(metalurgie\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Žihání_(metalurgie))
- [12] LENFELD, Petr. Technologie tváření kovů. *Ksp.tul* [online]. Liberec: Technická univerzita [cit.2020-04-04]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/01.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm)
- [12] Tavení čistých kovů a slitin. *Ptc.zshk* [online]. Hradec Králové: Vyšší odborná škola zdravotnická a Střední zdravotnická škola [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://ptc.zshk.cz/vyuka/taveni-cistych-kovu-a-slitin.aspx>
- [13] Kalení. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kalení>
- [14] Legování. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Legování>
- [15] Slitina. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Slitina>
- [16] Tváření. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Tváření>

- [17] Druhy žíhání. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2012 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Žíhání\\_\(metalurgie\)#/media/Soubor:Žíhání.jpg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Žíhání_(metalurgie)#/media/Soubor:Žíhání.jpg)
- [18] Výhřevnost paliv. In: POLEDŇÁKOVÁ, Dagmar. *Slideplayer* [online]. Hranice: SPŠ Hranice [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/12208101/>
- [19] Railway-cutting. In: , Skatebiker. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%98ez%C3%A1n%C3%AD\\_plamenem#/media/Soubor:Railway-cutting-2-a.jpg](https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%98ez%C3%A1n%C3%AD_plamenem#/media/Soubor:Railway-cutting-2-a.jpg)
- [20] TIMORANSKÁ, Marcela. *Úprava pitné vody* [online]. In: . Písek: ZŠ Kovářov, s. 8 [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/11662904/>
- [21] Indukční kalení a kalicí stroje. *Rajmont* [online]. Rajmont [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.rajmont.cz/produkty-indukcni-kaleni/>
- [22] Admin. Kelimek princip: Princip ohřevu. In: *Enpedie* [online]. Praha: Centrum výzkumu Řež, 2012 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: [http://enpedie.cz/wiki/Soubor:Kelimek\\_princip.jpg#filelinks](http://enpedie.cz/wiki/Soubor:Kelimek_princip.jpg#filelinks)
- [23] Laboratoř studených kelímků. In: *Susen2020* [online]. Praha: Centrum výzkumu Řež, 2015 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <http://susen2020.cz/projekty/infrastruktura/vyhled-2015-infrastruktura-projektu-susen/laborator-studenych-kelimku/>
- [24] STEIDL, Josef. Perspektivy vysokofrekvenčního svařování termoplastů. [online]. [cit. 9. února2016]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/perspektivy-vysokofrekvencniho-svarovani-termoplastu.html>
- [25] NOVÁK, Pavel. Základy elektrotepelnej techniky.[online]. Košice: Technická univerzita. [cit. 2. září 2015]. Dostupné z: [http://people.tuke.sk/pavol.novak/Subory/Novak\\_skripta.pdf](http://people.tuke.sk/pavol.novak/Subory/Novak_skripta.pdf)
- [26] FÍK, Josef. Plynové spotřebiče (III)[online]. [cit. 31. října2015]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2039-plynove-spotrebice-iii>
- [27] Svařování. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD>
- [28] VÁVROVÁ, Růžena. Odporový ohřev Přímý odporový ohřev. In: *Slideplayer* [online]. [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/17786356/>