

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Přednosti elektrotepelných technologií

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš BEZDĚK**
Osobní číslo: **E14N0057P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Přednosti elektrotepelných technologií**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Uveďte přehledně používané elektrotepelné technologie a principy vzniku technologického tepla přeměnou elektrické energie.
2. Uveďte jeho výhody a nevýhody v porovnání s jinými druhy ohřevů.
3. Popište aplikaci elektrotepelné technologie užívané pro vysokoteplotní tavení elektricky vodivých materiálů.
4. Proveďte úvahu o perspektivě elektrotepelných technologií z pohledu hodnocení kritériem 3E.

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


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

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

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


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




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

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na elektrotepelné technologie a vznik technologického tepla přeměnou elektrické energie. Jsou zde přehledně a stručně popsány jednotlivé metody ohřevů od klasických až po moderní. Na konci druhé kapitoly je řešen příklad na ohřev válcové vsázky. Dále je zde z různých hledisek provedeno porovnání zdrojů technologického tepla. Část práce je věnována technologii studeného kelímku a vysokoteplotnímu tavení elektricky vodivých i nevodivých materiálů. Na závěr práce je provedena úvaha o perspektivě elektrotepelných technologií s přihlédnutím k hospodárnosti, účelnosti a efektivitě.

Klíčová slova

Technologické teplo, indukční ohřev, porovnání, studený kelímek, vysokoteplotní tavení, perspektiva

Abstract

This dissertation is focused on electrothermal technology and generation of technological heat by conversion of electrical energy. Very clearly and briefly are described heating methods from classical to modern. At the end of the second chapter is solved induction heating of cylindrical material. Sources of technological heat are compared from different aspects. One section of the work is devoted to the technology of cold crucible. There is described melting of conductive and non-conductive materials with high temperature of melting. Consideration about perspective of electrothermal technology with regard to economy, efficiency and effectiveness is performed at the end of this work.

Key words

Technological heat, induction heating, comparison, cold crucible, high temperature melting, perspective

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Horušanech dne 6.5.2016

Tomáš Bezděk

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD.....	12
1 TECHNOLOGICKÉ TEPLA.....	13
2 ELEKTROTEPELNÉ TECHNOLOGIE.....	14
2.1 ODPOROVÝ OHŘEV	14
2.1.1 Přímý odporový ohřev	15
2.1.2 Nepřímý odporový ohřev	16
2.1.3 Elektrodový ohřev.....	16
2.1.4 Ohřev infračerveným zářením	16
2.2 DIELEKTRICKÝ OHŘEV	17
2.2.1 Mikrovlnný ohřev.....	18
2.3 OBLOUKOVÝ OHŘEV	19
2.4 PLAZMOVÝ OHŘEV	20
2.5 ELEKTRONOVÝ OHŘEV	21
2.6 LASEROVÝ OHŘEV.....	22
2.7 INDUKČNÍ OHŘEV	23
2.7.1 Využití indukčního ohřevu	26
2.7.1.1 Indukční tavicí pec kelímková	27
2.7.1.2 Indukční tavicí pec kanálková.....	27
2.7.1.3 Další využití indukčních ohřevů	28
2.7.2 Výpočet kmitočtu při ohřevu válcové vsázky	31
3 POROVNÁNÍ ZDROJŮ TECHNOLOGICKÉHO TEPLA.....	36
3.1 PALIVOVÝ OHŘEV	38
3.1.1 Plynový ohřev v průmyslových aplikacích	39
3.2 ELEKTRICKÝ OHŘEV	41
3.2.1 Přednosti indukčního ohřevu.....	42
3.3 SOLÁRNÍ SOUSTAVY PRO PRŮMYSLOVÉ APLIKACE	43
4 VYSOKOTEPLTNÍ TAVENÍ MATERIÁLŮ	45

4.1	STUDENÝ KELÍMEK	46
4.2	TAVENÍ ELEKTRICKY NEVODIVÝCH MATERIÁLŮ	48
4.3	TAVENÍ ELEKTRICKY VODIVÝCH MATERIÁLŮ	48
4.3.1	<i>Tavení titanu</i>	49
4.3.1.1	Tavení slitin titanu metodu VAR	49
4.3.1.2	Tavení slitin titanu metodou ISM	51
4.4	PŘEHLED DALŠÍCH VÝHOD TAVENÍ VE STUDENÉM KELÍMKU	53
4.5	VYUŽITÍ STUDENÉHO KELÍMKU	53
4.5.1	<i>Vitrifikace radioaktivního odpadu</i>	54
5	PERSPEKTIVA ELEKTROTEPELNÝCH TECHNOLOGIÍ	55
5.1	HODNOCENÍ ELEKTROTEPELNÝCH TECHNOLOGIÍ POMOCÍ KRITÉRIA 3E	57
	ZÁVĚR	59
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	61

Seznam symbolů a zkratk

a_2	hloubka vniku	[m]
d, d_2	průměr	[m]
E	intenzita elektrického pole	[V/m]
f	frekvence	[Hz]
H	intenzita magnetického pole	[A/m]
I	elektrický proud	[A]
J	proudová hustota	[A/m ²]
j	imaginární jednotka	[-]
k	konstanta šíření	[-]
L	vlastní indukčnost cívky	[H]
l	délka	[m]
M	vzájemná indukčnost	[H]
N	Poyntingův vektor	[W/m ²]
P	výkon	[W]
Q	teplo	[J]
R	elektrický odpor	[Ω]
r, r_2	poloměr	[m]
S	průřez vodiče	[m ²]
t	čas	[s]
U	elektrické napětí	[V]
x_2	argument válcové vsázky	[-]
α	fázová konstanta	[-]
β	měrný útlum	[-]
γ	elektrická vodivost	[S/m]
ϵ_0	permitivita vakua	[F/m]
ϵ_r	relativní permitivita	[-]
μ_0	permeabilita vakua	[H/m]
μ_r	relativní permeabilita	[-]
ρ	rezistivita	[Ω.m]
ω	úhlová frekvence	[s ⁻¹]

ERÚ	Energetický regulační úřad
ISM	Induction Skull Melting = indukční tavení ve studeném kelímku
VAR	Vacuum Arc Remelting = přetavování obloukem ve vakuu

konstanty:

$$\begin{array}{ll} \epsilon_0 \doteq (1/36\pi) \cdot 10^{-9} \text{ F/m} & \text{permitivita vakua} \\ \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} & \text{permeabilita vakua} \end{array}$$

vektorové veličiny - *tučně kurzíva* např.: \mathbf{E}

fázory vektorových veličin – *tučně kurzívou* s pruhem nad veličinou např.: \vec{E}

matematické operátory:

rot	rotace
div	divergence
grad	gradient
∇	Hamiltonův operátor (nabla)
Δ	Laplaceův operátor (platí: $\Delta = \nabla^2$)

Úvod

Tématem této diplomové práce jsou přednosti elektrotepelných technologií. Jedná se o technologie, které umožňují vznik tepla přeměnou elektrické energie. Technologické teplo se však nemusí získávat pouze přeměnou z elektrické energie, ale existují i další možnosti jako jsou spalování fosilních paliv nebo využití sluneční energie. Hlavním cílem mé práce je tyto metody porovnat z různých hledisek za předpokladu, že použití elektrické energie je nejvýhodnějším způsobem, jak získat teplo pro technologické účely.

V první části mé práce jsou přehledně uvedeny klasické i moderní metody elektrických ohřevů. Ke každému typu je stručně popsán princip vzniku tepla a jeho možné využití v praxi. Nejvíce prostoru je věnováno ohřevu indukčnímu. Tento perspektivní ohřev patří mezi nejpoužívanější způsob přeměny elektrické energie na teplo. Pro efektivní využití indukčního ohřevu je důležitá zejména správná volba frekvence, na což poukazuje výpočet kmitočtu při ohřevu válcové vsázky v kapitole 2.7.2.

Zmiňované porovnání zdrojů technologického tepla je uvedeno ve třetí kapitole. V další části práce jsou za použití odborných zdrojů literatury popsány elektrotepelné technologie, jež jsou vhodné pro vysokoteplotní tavení elektricky vodivých materiálů.

V poslední kapitole je provedena úvaha nad tím, zda jsou elektrotepelné technologie vůbec perspektivní do budoucna s ohledem na efektivitu, účelnost a hospodárnost.

1 Technologické teplo

Technologické teplo je teplo, které se využívá ve zpracovatelských a výrobních procesech. Toto teplo lze vyrobit pomocí různých zdrojů. Jedná se o sluneční energii, chemickou energii fosilních paliv (ropa, uhlí, zemní plyn) a v poslední době nejvíce upřednostňovanou elektrickou energii.

Vědním oborem, který se zabývá přeměnou elektrické energie v teplo, je elektrotepelná technika. Teplo je formou přenosu energie. Je vyvolané působením neusměrněných mikroskopických sil. Přenos tepla prostředím se uskutečňuje pomocí nosičů energie. Druh nosičů, jejich rychlost ale i způsob přemísťování závisí na charakteru prostředí. Nosiči energie mohou být elementární částice nebo elektromagnetické vlnění.

Způsoby přemísťování nosičů energie lze rozdělit podle koncentrace částic látky v daném prostředí. V prostředích s vysokou koncentrací částic dochází k přenosu tepla z míst s vysokou tepelnou koncentrací do míst s nižší koncentrací. Jedná se o látky v pevném nebo kapalném skupenství. V proudících kapalinách přispívá k přenosu energie ještě přenos energie hmotností prostředí. Tento způsob přenosu závisí na rychlosti proudící kapaliny. V prostředích s nízkou koncentrací částic dochází k přemísťování nosičů energie zářením.

Existují tedy 3 způsoby přenosu tepla:

- vedení tepla (kondukce)
- proudění tepla (konvekce)
- sálání tepla (radiace). [5],[6],[7]

2 Elektrotepelné technologie

Elektrické ohřevy se rozlišují podle fyzikálních principů přeměny elektrické energie na užitečné teplo. Z časového hlediska je můžeme ještě rozdělit na klasické metody ohřevů a odvozené nebo moderní metody.

Klasické metody elektrických ohřevů jsou:

- odporový ohřev
- indukční ohřev
- dielektrický ohřev
- obloukový ohřev

Mezi odvozené a moderní elektrické ohřevy patří:

- elektrodový ohřev
- infračervený ohřev
- mikrovlnný ohřev
- plazmový ohřev
- elektronový ohřev
- laserový ohřev [7]

2.1 Odporový ohřev

Elektrotepelná zařízení odporová pracují na principu Jouleova zákona. Prochází-li vodičem elektrický proud, vzniká ve vodiči teplo. Teplo, jež se předává do svého okolí, je úměrné druhé mocnině proudu a elektrickému odporu vodiče.

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t = P \cdot t \quad (2.1)$$

Kde:

R (Ω) je odpor vodiče

I (A) je procházející proud

t (s) je doba, po kterou prochází proud vodičem.

Odpor vodiče je dán vztahem:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (2.2)$$

kde:

ρ [$\Omega \cdot m$] je rezistivita materiálu

l [m] je délka vodiče

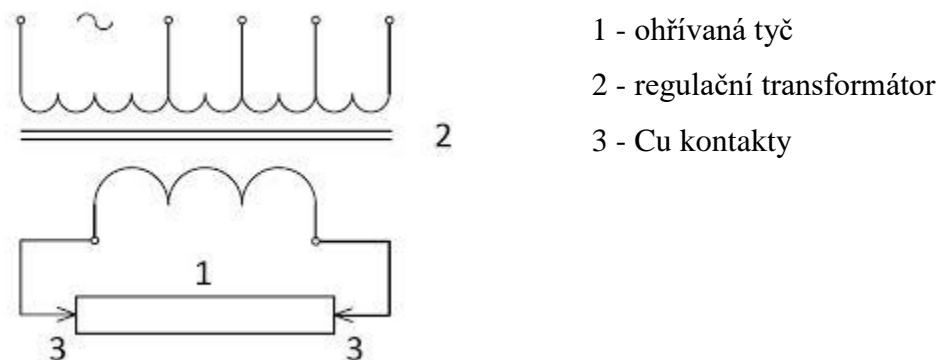
S [m^2] je průřez vodiče.

Odporová zařízení se rozdělují podle vzniku a působení tepla na 2 skupiny, a to na zařízení s přímým odporovým ohřevem a zařízení s nepřímým odporovým ohřevem.

2.1.1 Přímý odporový ohřev

Přímý odporový ohřev je takový ohřev, při kterém dochází k přeměně elektrické energie na teplo přímým průchodem proudu ohřivaným materiálem – vsázkou nebo elektricky vodivou kapalinou – elektrolytem.

Tento druh odporového ohřevu se používá například pro ohřev dlouhých kovových tyčí, v pecích na výrobu grafitu nebo ve sklárnách pro výrobu skla. [1],[5]



Obr. 1 Přímý odporový ohřev tyčí [6]

2.1.2 Nepřímý odporový ohřev

Při nepřímém odporovém ohřevu vzniká teplo v topných člancích a na povrch vsázky se dostává zejména sáláním topných článků a prouděním vzduchu. Zařízení s nepřímým odporovým ohřevem se nazývají odporové pece. Ty se dají rozdělit podle několika hledisek. Nejzákladnější dělení je podle teploty:

1. nízkoteplotní pece do 600 °C
2. středoteplotní pece od 600 °C do 1100 °C
3. vysokoteplotní pece nad 1100 °C.

Podle atmosféry uvnitř pece:

1. s normální atmosférou
2. s řízenou atmosférou
3. pracující s vakuem.

Podle toho, zda se vsázka při ohřevu pohybuje či nikoli, na pece:

1. s nepohybující se vsázkou a přerušovaným provozem
2. se vsázkou procházející pecí a nepřerušovaným provozem. [1]

2.1.3 Elektrodový ohřev

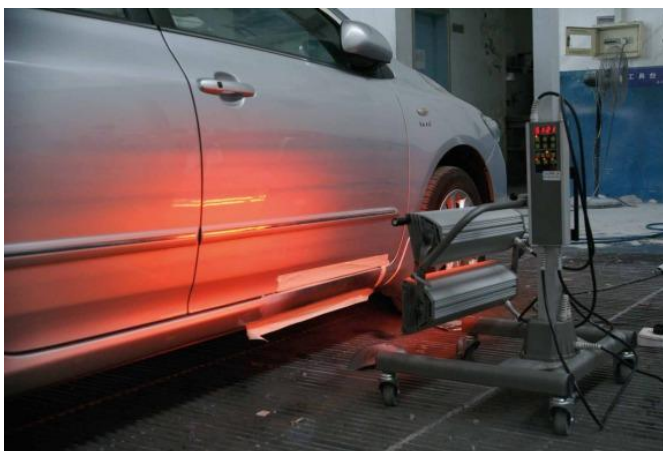
Elektrodový ohřev funguje na stejném principu jako přímý odporový ohřev. Ohříváním materiálem je tekutá vsázka, například voda nebo elektrolyt. Teplo je do vsázky přiváděno přes soustavu dvou či více elektrod. Tento ohřev se využívá v elektrodových kotlích pro ohřev vody, sklářských tavicích pecích nebo při termické elektrolýze. [7]

2.1.4 Ohřev infračerveným zářením

Jedná se o speciální případ odporového ohřevu. Při tomto ohřevu je z rozžhaveného pevného tělesa vyzařována energie o vlnové délce větší než 0,78 μm a menší než je vlnová délka mikrovlnného záření. Tato energie je přenášena na ohřívanou vsázku (ozařovaný předmět) v podobě infračerveného záření. Při dopadu na vsázku se energie pohlcuje a mění v teplo.

Infračervený ohřev se používá v mnoha odvětvích. V textilním průmyslu to je k sušení a barvení látek, v zemědělství k sušení obilí a při odchovu kuřat. V automobilovém průmyslu se

pomocí infračerveného ohřevu vytvrzuje lak na karosériích automobilů. Další uplatnění tohoto ohřevu je například při výrobě keramiky. [1],[7]

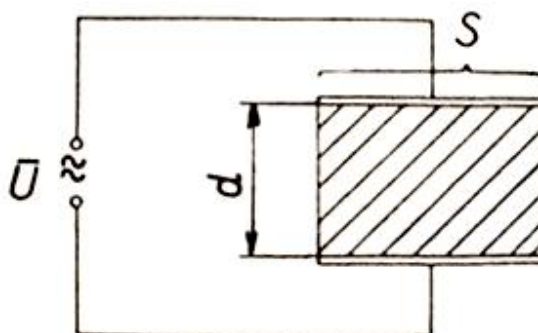


Obr. 2 Sušení nátěrů [11]

2.2 Dielektrický ohřev

Dielektrický ohřev slouží k ohřívání elektricky nevodivých materiálů. Dielektrická elektrotepelná zařízení jsou analogická s indukčními zařízeními. Uplatňuje se u nich elektrická složka vlnění, zatímco u indukčních je to složka magnetická. K ohřevu se využívá kondenzátor, zatímco u indukčních je to cívka.

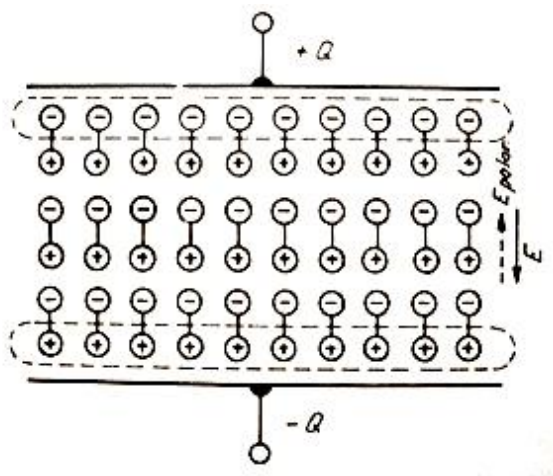
Princip tohoto ohřevu je následující. Mezi elektrody kondenzátoru se vloží elektricky nevodivá látka (obr. 3).



Obr. 3 Schematické uspořádání kondenzátoru pro dielektrický ohřev [3]

Po připojení napětí na elektrody se vytvoří elektrické pole. V tomto poli dochází k polarizaci dielektrika (obr. 4). Molekuly vložené látky se chovají jako elektrické dipóly. Podle elektrické polarizace se natáčejí, přičemž dochází k tření a vzniká teplo. Množství tepla závisí na velikosti napětí, kmitočtu, vlastnostech materiálu a vzdálenosti elektrod. Velikost napětí je však omezena možností průrazu dielektrika a z toho důvodu lze tepelný výkon zvyšovat jen rostoucí frekvencí zdroje. Ta se pohybuje v rozsahu 10^6 až 10^9 Hz.

Dielektrický ohřev se využívá například při lisování součástí z plastů, při výrobě sklolaminátů, sušení materiálů (dřevo, vlna, papír) nebo v potravinářském průmyslu. [1],[3],[6]



Obr. 4 Polarizace dielektrika [1]

2.2.1 Mikrovlnný ohřev

Dielektrický ohřev do 500 MHz lze označit jako vysokofrekvenční ohřev. Pro frekvence vyšší se pak jedná o ohřev mikrovlnný. Každé mikrovlnné zařízení je tvořeno ze 3 základních částí: zdroje mikrovlnného záření, přenosové části a pracovního prostoru. Zdrojem mikrovlnného záření je speciální vakuová elektronka tzv. magnetron. Ze zdroje jsou mikrovlny vyzařovány pomocí antény a směřovány přenosovou částí – vlnovodem do pracovního prostoru. Tím už není kondenzátor, jak tomu bylo u nižších frekvencí, ale dutinový rezonátor. V něm vzniká stojaté elektromagnetické vlnění. K dosažení rovnoměrného ohřevu se vsázka otáčí nebo je použito otáčející se kovové křídélko, které míchá stojatým vlněním. Mikrovlnný ohřev se používá v potravinářském, farmaceutickém, chemickém, gumárenském průmyslu, v zemědělství, při výrobě a zpracování plastů a mnoha dalších odvětvích. [6],[12]

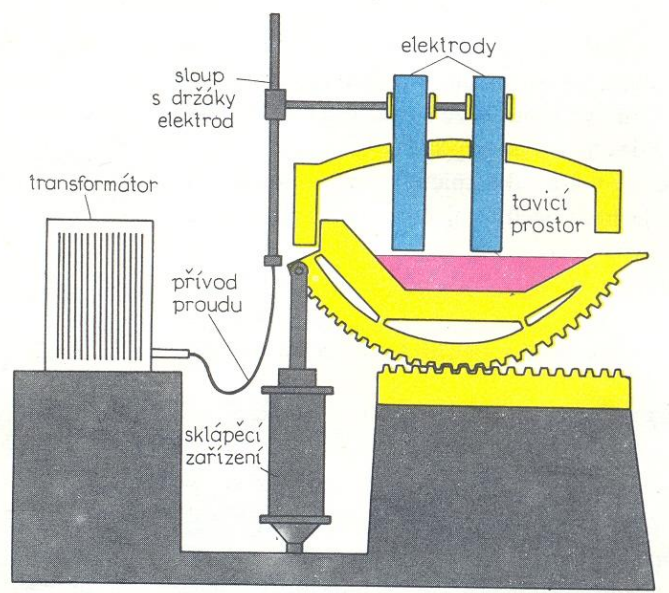
2.3 Obloukový ohřev

Obloukový ohřev je elektrický ohřev, při kterém vzniká teplo přeměnou elektrické energie v silném elektrickém oblouku. Oblouk hoří v ionizovaném prostředí plynů, které jsou za normálních podmínek nevodivé. Elektricky vodivými se stávají až ionizací prostředí, která může být způsobena například radioaktivním zářením, elektrickým polem nebo vysokou teplotou. Teplota v oblouku dosahuje hodnoty až 7000 K. Ionizované prostředí s takto vysokou teplotou se nazývá plazma. Oblouk může být stejnosměrný nebo střídavý.

Elektrický oblouk vzniká následovně. Elektrody se připojí na napětí. Jestliže dojde k jejich kontaktu, začne obvodem protékat proud. Po oddálení elektrod od sebe se mezi nimi vytvoří vodivá cesta díky ionizaci prostředí. Mezi elektrodami vznikne oblouk.

Tento princip se využívá v obloukových pecích. Podle způsobu přenosu tepla na vsázku rozlišujeme pece:

- s přímým obloukem – oblouk hoří mezi elektrodou a vsázkou
- s nepřímým obloukem – oblouk hoří mezi dvěma elektrodami a teplo se do vsázky přenáší sáláním
- se zakrytým obloukem – oblouk hoří mezi elektrodami a vsázkou, elektrody jsou v uzavřeném prostoru pod vrstvou kusové vsázky. [1],[6],[8],[10]



Obr. 5 Schéma obloukové pece [9]

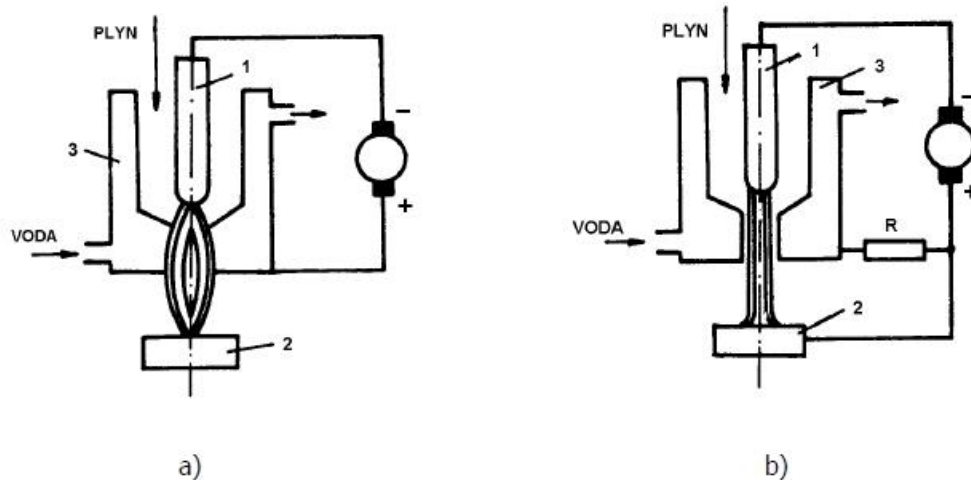
2.4 Plazmový ohřev

Plazmová zařízení pracují na podobném principu jako zařízení oblouková. V obloukových zařízeních se na vzniku plazmy v oblouku podílejí zejména výpary z elektrod a okolní plyny. U plazmových zařízení se plazma vytváří pomocí různých plazmotvorných plynů. Nejčastěji se používá argon. Podle velikosti teploty rozdělujeme plazmu na vysokoteplotní (10^5 K až 10^6 K) a nízkoteplotní (10^3 K až 10^4 K). V elektrotepelných zařízeních se využívá plazma nízkoteplotní. K jejímu vytvoření se používají 2 způsoby:

- a) indukční – bezelektrodové plazmové hořáky
- b) pomocí elektrického výboje mezi elektrodami – elektrodové plazmové hořáky.

V hutnictví se častěji používají plazmové hořáky, které využívají elektrický oblouk koncentrovaný tryskou hořáku s aerodynamickým účinkem plazmotvorného plynu. Ve stabilizovaném oblouku pak probíhá přeměna elektrické energie na tepelnou. Hořák může být napájen ze stejnosměrného nebo střídavého zdroje proudu. Hořáky (obr. 6) se dají rozdělit na 2 skupiny:

- a) hořák s nezávislým obloukem – ionizovaný plyn získává energii ve výboji mezi katodou 1 a anodou 3 a dále expanduje horký oblouk tryskou ven z hořáku
- b) hořák se závislým obloukem – mezi katodou 1 a anodou 3 se uzavírá pomocný oblouk při nízkém napětí. Hlavní oblouk hoří mezi katodou a ohřívaným materiálem 2 při vyšším napětí.



Obr. 6 a) Hořák s nezávislým obloukem b) se závislým obloukem [7]

Plazmová zařízení se používají v plazmových pecích, ke svařování, řezání kovů nebo stříkání těžkotavitelných materiálů. [1],[6],[7]

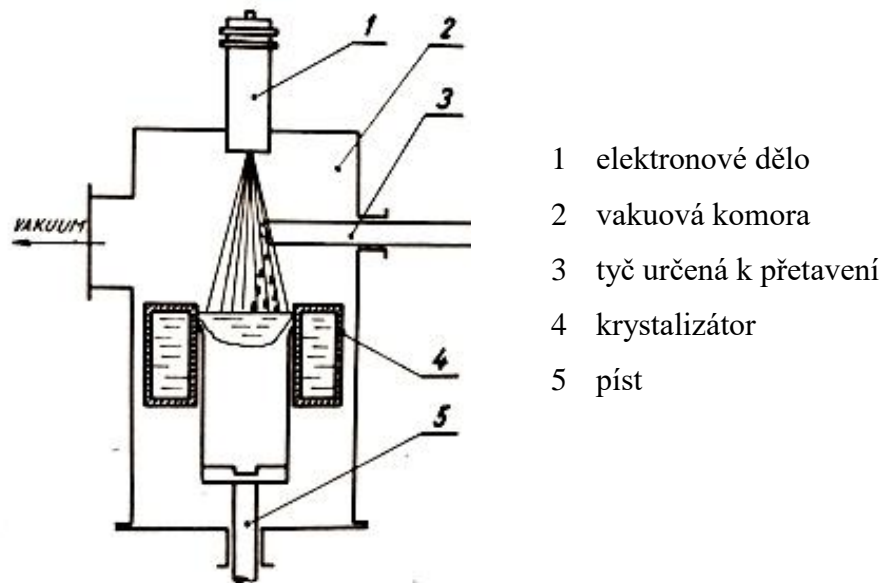


Obr. 7 Plazmové řezání [13]

2.5 Elektronový ohřev

Při elektronovém ohřevu se teplo získává z dopadajících urychlených elektronů na ohříváný materiál. Urychlené elektrony odevzdávají vsázce svoji kinetickou energii. Elektronový paprsek je generován v elektronovém dělu. Podle uspořádání elektrod mohou být děla s axiálním systémem, s prstencovou katodou nebo s příčným paprskem. Zdrojem volných elektronů tvořících elektronový paprsek je wolframová katoda žhavená průchodem proudem. Urychlený elektron dokáže proniknout do hloubky pouze několika mikrometrů. Jedná se tedy o výrazný povrchový ohřev. Elektrony jsou při své cestě brzděny srážkami s molekulami plynu. Aby se zabránilo těmto srážkám, probíhá celý proces ve vakuu. Anodou může být buď přímo samotná vsázka, nebo je anoda samostatná a slouží k urychlení elektronového paprsku dopadajícího na ohříváný materiál.

Elektronový paprsek lze využít v mnoha aplikacích. Nejrozšířenější je svařování elektronovým paprskem. Dále ho lze použít při tavení kovů, řezání, pájení, spékání kovů nebo k vyvolání chemické reakce, potřebné pro výrobu čipů v elektrotechnice. K přetavování kovů se používají elektronové tavicí pece (obr. 8). [1],[6],[14]



Obr. 8 Přetavovací elektronová pec [13]

2.6 Laserový ohřev

Laser je všeobecný název pro kvantové generátory monochromatického elektromagnetického vlnění s frekvencemi v oblasti světla (10^{14} Hz). Mezi základní technické prvky laseru patří zdroj budící energie, aktivní prostředí a optický rezonátor. Laser pracuje na principu stimulované emise elektromagnetického záření. Zdroj budící energie slouží k dodání energie elektronům v aktivním prostředí. Dochází k tzv. přečerpání elektronů z nižší energetické hladiny na vyšší. Při návratu elektronů zpátky na nižší energetickou hladinu dochází při řízené emisi k uvolnění nahromaděné energie.

Laserový ohřev materiálu spočívá v pohlcování laserového paprsku. Energie paprsku se absorpcí přeměňuje na teplo. U kovů proniká laserový paprsek do hloubky pouze $0,01 \mu\text{m}$ až $0,1 \mu\text{m}$. Teplo tedy vzniká jen v této povrchové vrstvě. Díky jejímu rychlému ohřevu se vytvoří teplotní gradient a teplo pak proniká do větší hloubky vedením. Laserový paprsek dopadá jen na velmi malou plochu povrchu. Ohřívání větší plochy lze zařídit 2 způsoby:

- a) použitím integrátoru záření, kdy speciální zrcadlo rozloží paprsek na několik dalších
- b) oscilací zaostřeného paprsku, kdy je paprsek vychýlen systémem zrcadel.

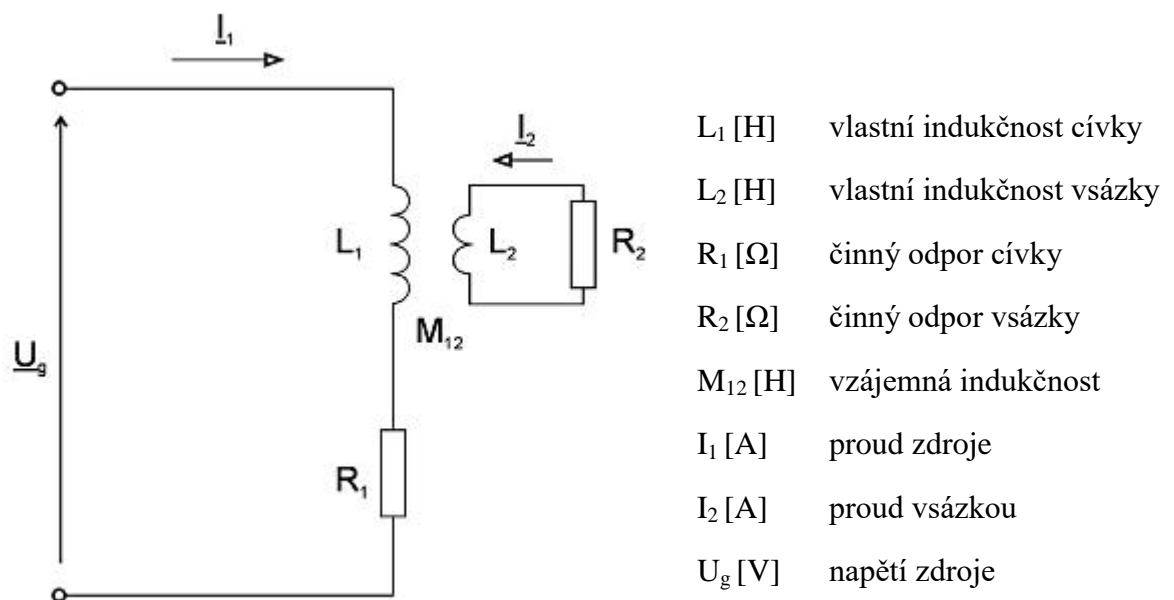
K dosažení co nejvyšší účinnosti ohřevu je potřeba dosáhnout co největší absorpce záření. Ta klesá s rostoucí elektrickou vodivostí ohřívávaného předmětu. Z toho důvodu se např. měď nebo hliník ohřívají hůře. Největší energetickou účinnost z plynových laserů má molekulární laser

CO₂.

Laser se používá k přetavování povrchových vrstev, k povrchovému kalení oceli, k povrchovému nanášení kovových vrstev, k řezání, vrtání velmi malých otvorů, svařování, v mikroelektronice a mnoha dalších aplikacích. [1],[6],[7],[10]

2.7 Indukční ohřev

Indukční ohřev je elektrický ohřev, který se provádí pouze u elektricky vodivých materiálů. Po vložení vsázky z vodivého materiálu do střídavého magnetického pole se v ní indukují vířivé proudy, které vsázku ohřívají. Indukční zařízení lze přirovnat k transformátoru (obr. 9), kde vsázka je sekundární stranou a je spojena nakrátko. Primární strana pak představuje ohřívací cívku - induktor. Teplo vzniká přímo ve vsázce, což patří mezi největší výhodu tohoto ohřevu. Další výhodou je možnost ovlivnění rozdělení tepla ve vsázce. To se provádí volbou frekvence proudu, který napájí ohřívací vinutí. Vsázka je zároveň nejteplejším místem celé soustavy. [1],[6]



Obr. 9 Náhradní elektrické schéma indukčního ohřevu [6]

Základy teorie indukčního ohřevu vycházejí ze zákonů elektrodynamiky, které jsou matematicky vyjádřeny pomocí Maxwellových rovnic. Elektromagnetické pole má vlnový charakter a je popsáno vlnovými rovnicemi, které se odvozují pomocí Maxwellových rovnic v diferenciálním tvaru.

$$1. \operatorname{rot} \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$2. \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2.4)$$

$$3. \operatorname{div} \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} = \rho \quad (2.5)$$

$$4. \operatorname{div} \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = 0 \quad (2.6)$$

Na rovnici (2.3) aplikujeme rotaci:

$$\operatorname{rot} (\operatorname{rot} \mathbf{H}) = \operatorname{rot} \gamma \mathbf{E} + \operatorname{rot} \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.7)$$

Pořadí derivací je možné zaměnit:

$$\operatorname{rot} (\operatorname{rot} \mathbf{H}) = \gamma \operatorname{rot} \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial (\operatorname{rot} \mathbf{E})}{\partial t} \quad (2.8)$$

Za $\operatorname{rot} \mathbf{E}$ se dosadí z rovnice (2.4):

$$\operatorname{rot} (\operatorname{rot} \mathbf{H}) = -\gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2.9)$$

Z vektorového počtu platí:

$$\operatorname{rot} (\operatorname{rot} \mathbf{H}) = \operatorname{grad}(\operatorname{div} \mathbf{H}) - \nabla^2 \mathbf{H} \quad (2.10)$$

Využitím tohoto vztahu (2.10) dostáváme:

$$\operatorname{grad}(\operatorname{div} \mathbf{H}) - \nabla^2 \mathbf{H} = -\gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2.11)$$

Z rovnice (2.6) víme:

$$\operatorname{div} \mathbf{H} = 0$$

Dostáváme výsledný tvar:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \gamma \mu_o \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \varepsilon_o \varepsilon_r \mu_o \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2.12)$$

Stejným způsobem lze odvodit vztah pro elektrickou složku \mathbf{E} :

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma \mu_o \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \varepsilon_o \varepsilon_r \mu_o \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.13)$$

Rovnice (2.12) a (2.13) jsou obecnými rovnicemi šíření elektromagnetického vlnění. Tyto rovnice se ještě dají zjednodušit. Pro vodivé prostředí lze zanedbat permitivitu ($\varepsilon = 0$) a pro nevodivé prostředí elektrickou vodivost ($\gamma = 0$). V technické praxi se nejčastěji používají harmonické průběhy \mathbf{E} a \mathbf{H} . Vlnové rovnice pro harmonické elektromagnetické vlnění se získají pomocí derivování fázorů $\bar{\mathbf{E}}$ a $\bar{\mathbf{H}}$ a dosazením do obecných rovnic (2.12) a (2.13).

Fázory $\bar{\mathbf{H}}$ a $\bar{\mathbf{E}}$:

$$\bar{\mathbf{E}} = \mathbf{E} e^{j\omega t} \quad (2.14)$$

$$\bar{\mathbf{H}} = \mathbf{H} e^{j\omega t} \quad (2.15)$$

První a druhá derivace:

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{E}}}{\partial t} = j\omega \mathbf{E} e^{j\omega t} = j\omega \bar{\mathbf{E}} \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{\mathbf{E}}}{\partial t^2} = -\omega^2 \mathbf{E} e^{j\omega t} = -\omega^2 \bar{\mathbf{E}} \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{H}}}{\partial t} = j\omega \bar{\mathbf{H}} \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{\mathbf{H}}}{\partial t^2} = -\omega^2 \bar{\mathbf{H}} \quad (2.19)$$

Dosazení rovnic (2.16) až (2.19) do (2.12) a (2.13):

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{H}} = \gamma \mu_o \mu_r j \omega \bar{\mathbf{H}} - \varepsilon_o \varepsilon_r \mu_o \mu_r \omega^2 \bar{\mathbf{H}} \quad (2.20)$$

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{E}} = \gamma \mu_o \mu_r j \omega \bar{\mathbf{E}} - \varepsilon_o \varepsilon_r \mu_o \mu_r \omega^2 \bar{\mathbf{E}} \quad (2.21)$$

Základní vlnové rovnice pro harmonické elektromagnetické vlnění:

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{H}} + k^2 \bar{\mathbf{H}} = 0 \quad (2.22)$$

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{E}} + k^2 \bar{\mathbf{E}} = 0 \quad (2.23)$$

Platí:

$$k^2 = -j\omega\mu(\gamma + j\omega\varepsilon) = (\alpha - j\beta)^2 \quad (2.24)$$

$$k = (\alpha - j\beta) \quad (2.25)$$

Koeficient k je konstanta šíření vlnění, α je fázová konstanta vlnění a β je měrný útlum.

[1],[15]

2.7.1 Využití indukčního ohřevu

Indukční elektrotepelná zařízení lze rozdělit podle několika kritérií. Například podle fyzikálního principu vzniku tepla na:

- a) indukční kelímkové pece a ohřívací zařízení na principu magnetického skinefektu
- b) indukční pece kanálkové na principu elektrického skinefektu.

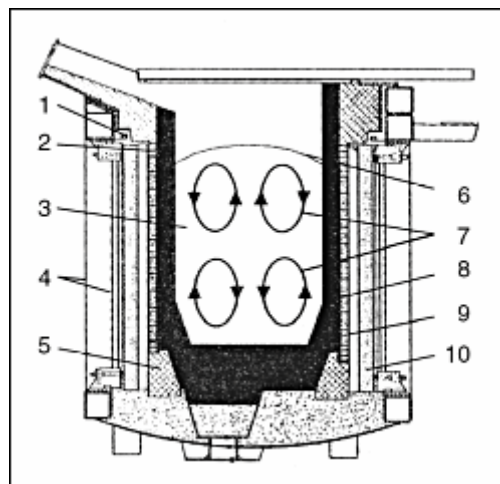
Podle použití jsou:

- a) indukční zařízení pro tepelné zpracování kovů – žíhání, povrchové kalení, tváření za tepla
- b) indukční zařízení na tavení kovů a jejich udržení v tekutém stavu. [5]

2.7.1.1 Indukční tavicí pec kelímková

Indukční kelímková pec se používá k tavení např. různých druhů ocelí. Patří mezi jednu z nejdůležitějších aplikací, které využívají indukční teplo. Konstrukční uspořádání kelímkové indukční pece je znázorněno na obr. 10, kde jsou: 1 kroužek spojený nakrátko, 2 vodou chlazený prsteneček, 3 tavenina, 4 ocelová kostra, 5 betonový prsteneček, 6 kopulovitá hladina taveniny, 7 pohyb taveniny, 8 kelímek, 9 induktor a 10 svazky transformátorových plechů.

Vodou chlazený induktor je napájený ze střídavého zdroje o frekvenci 50 až 1000 Hz. Indukované vířivé proudy a elektromagnetické síly uvnitř kelímku mají za následek proudění materiálu. Tlak magnetických sil na vsázku způsobuje u stěny kelímku podtlak v tavenině, uprostřed naopak dochází k přetlaku. To se projevuje vzedmutím hladiny, což je vidět na obr. 10 jako kopulovitá hladina taveniny. Díky pohybu taveniny je zajištěna homogenita kovu. [1],[16]

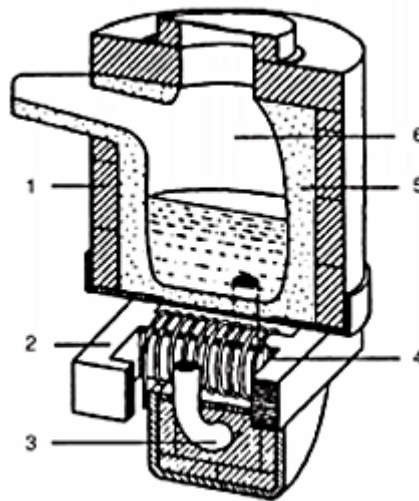


Obr. 10 Konstrukční uspořádání kelímkové indukční pece [16]

2.7.1.2 Indukční tavicí pec kanálková

Konstrukční provedení kanálkové indukční pece je na obr. 11, kde jsou: 1 izolace, 2 jádro transformátoru, 3 kanálek, 4 primární cívka, 5 žárupevná vyzdívka, 6 tavicí prostor. Tuto pec si zjednodušeně lze představit jako transformátor s uzavřeným železným jádrem, kde primární stranou je cívka připojená na síť a sekundární stranou roztavený kov v kanálku. Kolem

kanálku vzniká elektromagnetické pole, které vytváří tlak na kov uvnitř kanálku. Ten je odtlačován od stěn kanálku do jeho středu, kudy vytéká do vany. Uvolněným místem po okrajích kanálku přitéká kov nový. Tím dochází k promíchávání a je zajištěna materiálová homogenita. Kanálkové pece se na rozdíl od kelímkových pecí staví přímo na frekvenci sítě 50 Hz. Používají se především pro tavení barevných kovů. Nevhodné je jejich použití v často přerušovaných provozech, jelikož se do nich musí nalít při začátku tavicího procesu již roztavený kov. [1],[6]



Obr. 11 Konstrukční uspořádání kanálkové indukční pece [16]

2.7.1.3 Další využití indukčních ohřevů

a) indukční ohřevy pro tváření

Pro tváření je zapotřebí, aby došlo k rovnoměrnému prohřátí materiálu. Z toho důvodu se volí pomalejší ohřev. Většina výrobních procesů je plně automatizována. Celý výrobní proces probíhá tak, že na vstupní straně induktoru se ze zásobníku bere studený kus, který se vkládá do induktoru. V induktoru dochází k jeho ohřátí na požadovanou teplotu. Na výstupu z induktoru je připraven kovací stroj, který ohřátý kus dále zpracovává. Indukční ohřevy pro tváření se využívají například při hromadné výrobě výkovek v automobilovém průmyslu nebo při výrobě šroubů. Na obrázku 12 je zobrazen indukční ohřev konců tyčí pro tvářecí účely. [1]

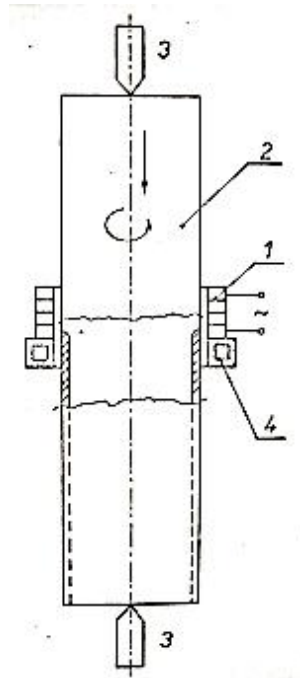


Obr. 12 Indukční ohřev konců tyčí [17]

b) povrchové kalení

Jedná se o povrchovou úpravu kovového materiálu, která slouží ke zlepšení mechanických vlastností. Pomocí povrchového kalení se zlepši odolnost materiálu proti opotřebení a zároveň je zachována jeho houževnatost. Tato metoda spočívá v rychlém zahřátí povrchu materiálu na teplotu kalení (např. u oceli 900 °C) do určité hloubky a následném ochlazení. Princip indukčního povrchového kalení (obr. 13) popíše na povrchovém kalení válců středních velikostí. Na obrázku je válec (2) uchycen mezi hroty (3), které umožňují otáčení válce a jeho pohyb dolů. Část povrchu nacházející se v dutině cívky (1) se indukčně ohřívá na požadovanou teplotu. Takto zahřátý povrch válce se dostane do prstence (4), ze kterého na něj stříká voda. Ta povrch ochlazuje a dochází k zakalení povrchové vrstvy.

Pro kalení se používají frekvence od 50 Hz do 500 kHz. Tato povrchová úprava se používá například u strojních součástí, jako jsou hřídele, čepy nebo ozubená kola. [1], [4], [18]



Obr. 13 Indukční povrchové kalení válců [4]

c) indukční pájení

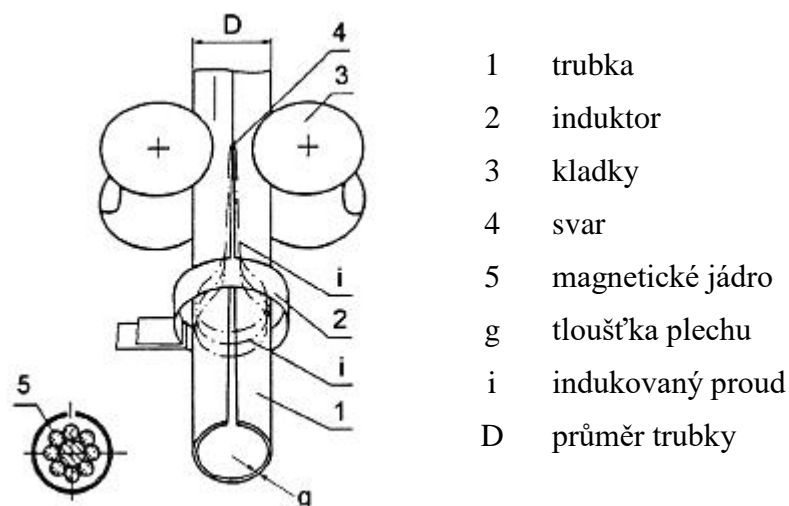
Při pájení dochází ke spojování dvou kovových částí pájkou při teplotě nižší, než je teplota tavení těchto dvou spojovaných kovů. Podle teploty tavení se dělí pájky na měkké s teplotou do 450 °C a tvrdé s teplotou nad 450 °C. Pro měkké pájení se většinou používají pájky ze slitin cínu a olova. Jako tvrdé pájky se používají například měď nebo stříbro. Indukční ohřev se používá zejména u tvrdého pájení. To se používá například pro spojování jednotlivých dílů vinutí transformátoru a točivých strojů. Díky indukčnímu ohřevu dochází k rychlému prohřátí spojovaného místa, což je výhodou při spojování dobře tepelně vodivých materiálů. [19], [20]

d) indukční žihání

Indukční žihání se používá pro ohřev kovů, které už prošly významným zpracováním. Aplikování indukčního žihání vede ke snížení tvrdosti, zlepšuje tažnost a uvolňuje vnitřní pnutí. Toho se využívá zejména v odvětví vyrábějícím trubky a duté profily. [21]

a) indukční svařování

Vzhledem k vysoké rychlosti a přesnosti se indukční svařování využívá zejména pro podélné svařování trubek a dutých profilů. Celý proces svařování probíhá tak, že neuzavřená trubka prochází indukční cívkou. Cívka je napájena z vysokofrekvenčního zdroje o rozsahu 250 až 400 kHz. Do trubky se naindukují proudy, které se uzavírají v místě styku vyvolaném funkcí přitlačných kladek. Tím vzniká v místě svaru potřebná teplota pro svaření (1400 °C). Svaření je dokončeno díky tlakovému zařízení (rotující válce nebo kladky), které stlačí oba konce trubky k sobě. [4],[21]



Obr. 14 Indukční svařování trubek [6]

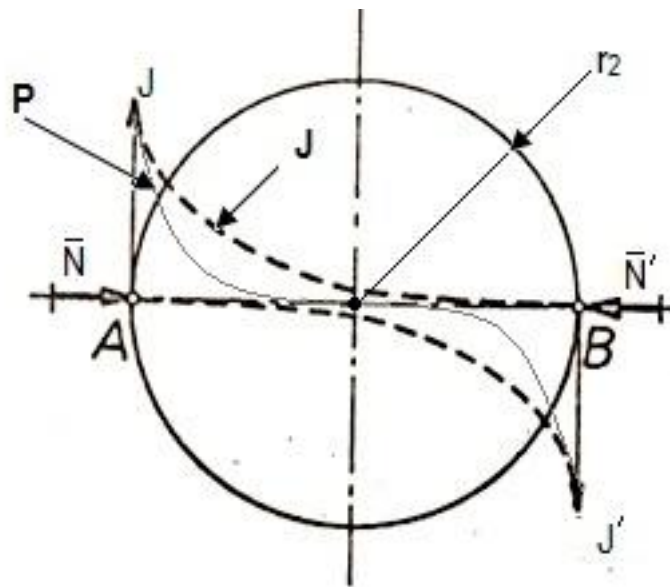
2.7.2 Výpočet kmitočtu při ohřevu válcové vsázky

Při ohřevu materiálu pro tvářecí účely, je důležité jeho rovnoměrné prohřátí. Toho se dá dosáhnout volbou vhodného kmitočtu. Pokud se zvolí příliš nízká frekvence, dochází k elektromagnetické pružnosti materiálu. Energetická účinnost takového ohřevu je malá. Pokud se zvolí naopak příliš vysoká frekvence, dochází k přehřívání povrchu a rostou ztráty vyzařováním tepla do okolí. Vnitřek vsázky se ohřívá pouze vedením tepla. Z těchto důvodů se volí optimální kmitočet tak, aby mezi poloměrem vsázky r_2 a hloubkou vniku a_2 platil vztah:

$$r_2 = (2,5 \div 3)a_2 \quad (2.26)$$

Příklad:

Mým úkolem je spočítat ohřev válcové vsázky (tyčové přířezy z nemagnetické oceli) o průměru 60 mm a následně provést kontrolu elektromagnetické průžařnosti. Při řešení vycházím pro zjednodušení výpočtu z úvahy, která je trochu analogická se stěnou velké tloušťky (rovinné vlnění). Vztah pro frekvenci odvodím pomocí následujícího obrázku. [1],[4]



Obr. 15 Ohřev plné válcové vsázky [4 – upraveno]

Na vsázku dopadá elektromagnetické vlnění, které je na obrázku značené pomocí Poyntingových vektorů \bar{N} , \bar{N}' v bodech A a B. To má za následek vznik proudu, který ohřívá vsázku. Tento proud má svoji proudovou hustotu J z jedné strany a J' z druhé strany. K prohřátí vsázky je zapotřebí, aby teplo P mělo průběh podobný jako je na obrázku 15. Teplo je úměrné druhé mocnině proudové hustoty. Když si představíme proudovou hustotu v první mocnině, její utlumení bude 2x pomalejší a průběh bude vypadat jako na obr. 15.

Z rovinného vlnění vyplývá:

- proudová hustota má útlum $e^{-\frac{x}{a}}$
- $P \sim J^2 \sim \left(e^{-\frac{x}{a}}\right)^2 = e^{-\frac{2x}{a}}$
- J se utlumuje na $2r_2 = d_2 \doteq 6a_2$
- teplo, které vznikne na poloměru $r_2 \doteq 3a_2$.

Výpočet:

zadané hodnoty: $d_2 = 60 \text{ mm}$; $\gamma = 10^6 \text{ S/m}$; $\mu_r = 1$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$

$$a_2 = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}} \quad (2.27)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2.28)$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (2.29)$$

$$r_2 \doteq 3a_2 \quad (2.30)$$

$$r_2 \doteq 3 \cdot \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}} \quad (2.31)$$

$$r_2^2 \doteq \frac{3^2 \cdot 2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma} = \frac{3^2 \cdot 2}{2\pi f \cdot \mu \cdot \gamma} \quad (2.32)$$

$$f \doteq \frac{3^2 \cdot 2}{2\pi \cdot r_2^2 \cdot \mu \cdot \gamma} = \frac{3^2 \cdot 2}{2\pi \cdot 0,03^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^6} = 2533,03 \text{ Hz} \quad (2.33)$$

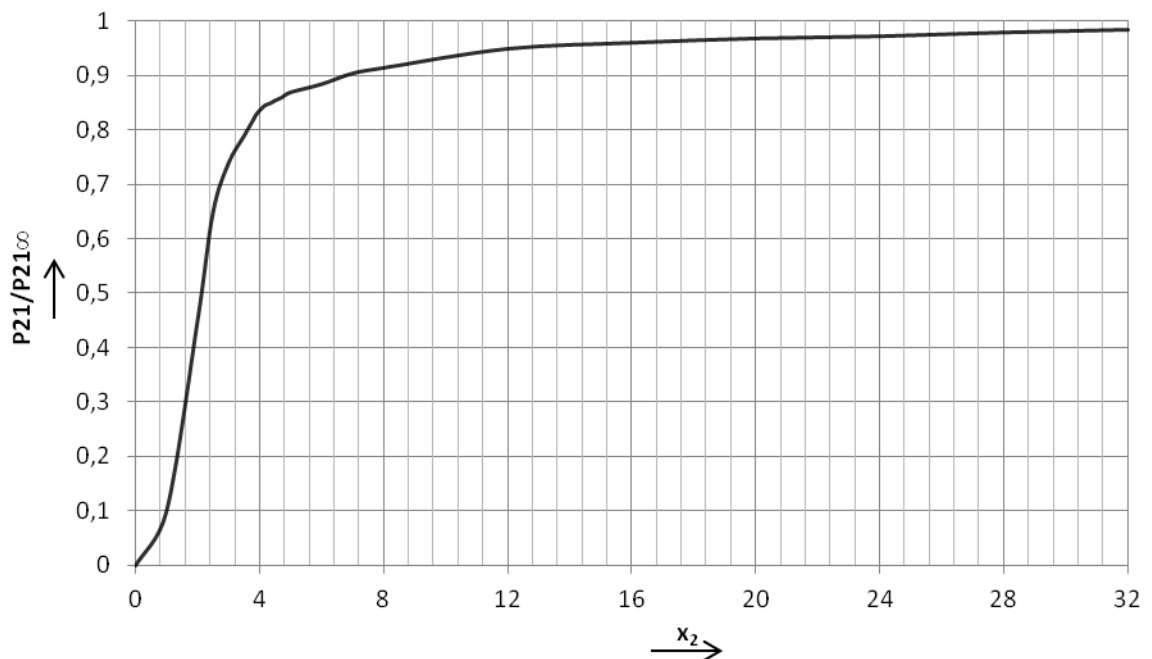
V praxi se pak používá nejčastěji vztah 2.26. Pro jeho střední hodnotu $r_2 = 2,75 a_2$ vychází hodnota frekvence:

$$f = \frac{2,75^2 \cdot 2}{2\pi \cdot r_2^2 \cdot \mu \cdot \gamma} = \frac{2,75^2 \cdot 2}{2\pi \cdot 0,03^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^6} = 2128,45 \text{ Hz} \quad (2.34)$$

Hodnota frekvence vhodná pro ohřátí válcové vsázky o průměru 60 mm mi vyšla 2128,45 Hz resp. 2533,03 Hz podle toho, jak jsem zvolil závislost poloměru vsázky r_2 na hloubce vniku a_2 .

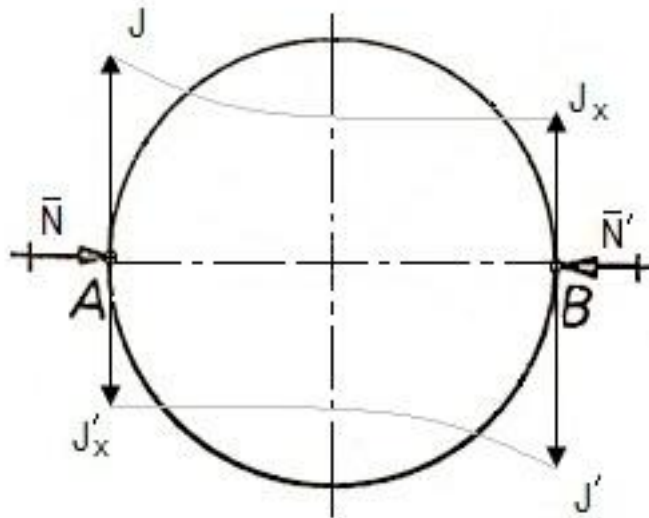
Kontrola elektromagnetické průzařnosti:

Kontrola elektromagnetické průzařnosti se provádí podle velikosti argumentu x_2 . Na následujícím obrázku je vidět závislost energie přeměněné na teplo na velikosti argumentu x_2 .



Obr. 16 Energie přeměněná na teplo v závislosti na x_2 [4 – upraveno]

Pokud je x_2 malé, pak je vsázka elektromagneticky průzařná a ohřev se děje s malou účinností, neboť výsledná velikost proudové hustoty například v bodě A je dána (podle obrázku 17) rozdílem $J - J'_x$. Jev elektromagnetické průzařnosti není žádoucí v případě požadavku na prohřátí plné válcové vsázky.



Obr. 17 Elektromagnetická průzařnost válcové vsázky [4 – upraveno]

Kontrolní výpočet pro $f = 2128,45$ Hz:

$$x_2 = \sqrt{2} \cdot \frac{r_2}{a_2} \quad (2.35)$$

$$x_2 = \sqrt{2} \cdot \frac{r_2}{\sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}}} \quad (2.36)$$

$$x_2 = \sqrt{2} \cdot \frac{0,03}{\sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot 2128,45 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^6}}} = \sqrt{2 \cdot 2,75} = 3,89 \quad (2.37)$$

Z grafu na obr. 16 pak můžeme odečíst množství elektromagnetické energie, která se ve válcové vsázce přemění na teplo. Pro hodnotu argumentu $x_2 = 3,89$ mi vyšlo přibližně 83 % energie.

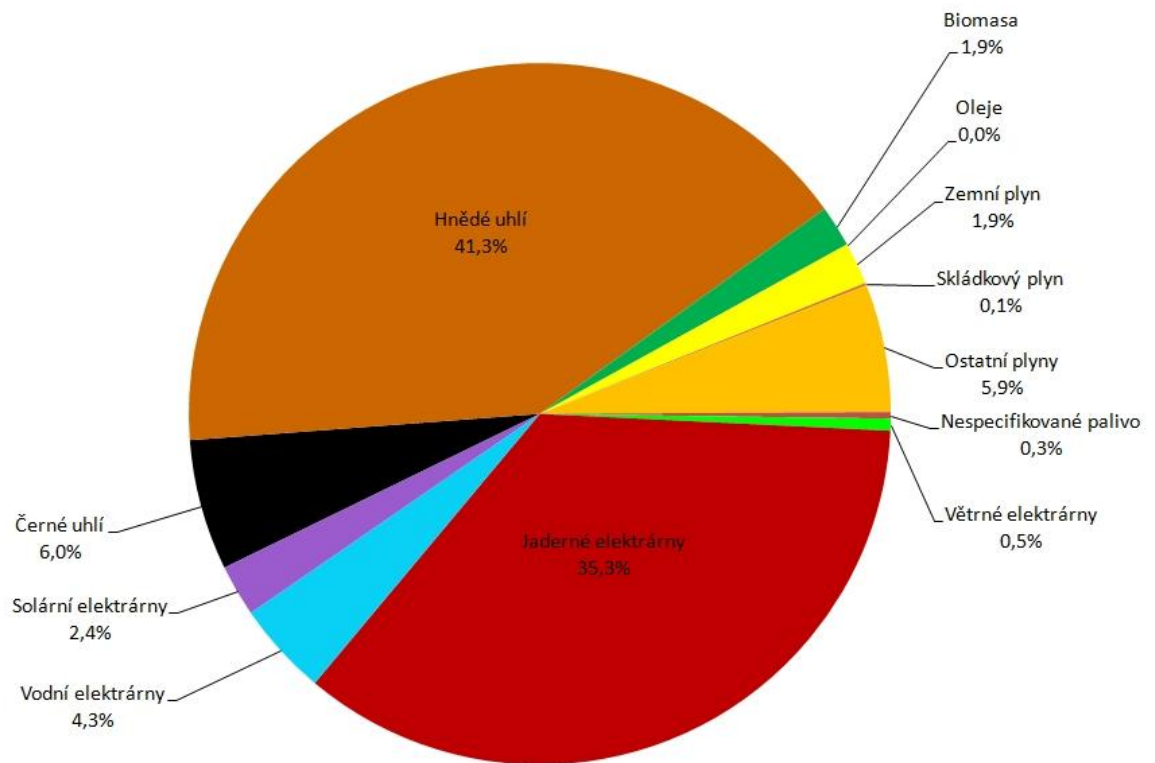
3 Porovnání zdrojů technologického tepla

V současné době se stále častěji při výrobě technologického tepla upřednostňuje výroba tepla přeměnou elektrické energie před klasickým palivovým procesem. Jedním z mnoha důvodů jsou klesající zásoby fosilních zdrojů energie. Odhad celosvětových zásob fosilních paliv podle statistik British Petroleum uvádím v tabulce 1.

Tab. 1 Celosvětové zásoby fosilních paliv [22]

fosilní palivo	odhad zásob
uhlí	200 let
zemní plyn	65 let
ropa	40 let

Z tohoto důvodu je hospodárnější využívání fosilních paliv v chemickém průmyslu. Pro výrobu tepla je efektivnější využití jiných zdrojů, zejména elektrické energie. Vhodným způsobem výroby elektrické energie je využití energie jádra nebo obnovitelných zdrojů (sluneční energie, energie vody, větru, spalování biomasy). Na obrázku 18 uvádím podíl zdrojů použitých pro výrobu elektřiny podle ERÚ v roce 2013.



Obr. 18 Výroba elektřiny podle typu paliv [23]

Pro porovnání klasických palivových ohřevů a elektrických ohřevů se používá mnoho kritérií. Mezi ně patří například:

- způsob přívodu energie do místa spotřeby
- konstrukční náročnost
- technologické parametry
- účinnost
- kvalita technologického procesu
- vliv na životní prostředí. [5],[7]

3.1 Palivový ohřev

Jak již bylo zmíněno na začátku 3. kapitoly, jako zdroje pro palivový ohřev se používají fosilní paliva. Ke generování tepla tedy dochází spalováním těchto paliv. Teplo se získává chemicko-tepelnou přeměnou v palivové peci. Účinnost této přeměny je dána účinností spalovacího procesu.

Zdroje energie je možné rozdělit podle skupenství následovně:

- tuhá paliva
- kapalná paliva
- plynná paliva.

Vzhledem k velkému znečišťování ohřívacího prostoru pecí, nižší výhřevnosti a obtížné regulovatelnosti se tuhá paliva v ohřívacích pecích spíše nepoužívají. Podobně na tom jsou i kapalná paliva. Ačkoliv použití kapalných paliv přináší mnohé výhody, jako je přesné dodržení ohřívací teploty, jednoduchost obsluhy a oproti tuhému palivu i čistý provoz, je díky klesajícímu množství zásob ropy vhodnější použití plyných paliv. Použití plyných paliv přináší mnoho výhod. Nejdůležitější z nich je přesné nastavení a dodržení ohřívací teploty. Dále to je také levnější doprava a čistota prostředí.

Jedním z kritérií hodnotícím efektivnost paliva je jeho spalné teplo. Jedná se o celkové množství tepla, které je uvolněno při dokonalém spalování média. Pro výpočet spotřeby tepla je důležité znát výhřevnost paliva. V následující tabulce č. 2 jsou výhřevnosti vybraných paliv. Hodnoty jsou brány jako orientační, jelikož na výhřevnost paliv má vliv několik faktorů (vlhkost, místo čerpání, atd.). [7],[24]

Tab. 2 Výhřevnosti paliv [24],[26]

palivo	výhřevnost
hnědé uhlí	10-18 MJ/kg
černé uhlí	16-30 MJ/kg
zemní plyn	33-36 MJ/m ³
svítiplyn	14-17 MJ/m ³
ropa	38-42 MJ/kg

3.1.1 Plynový ohřev v průmyslových aplikacích

Mezi hlavní skupinu průmyslových plynových spotřebičů patří ohřívací, sušící a tavící plynové pece. V plynové peci dochází k ohřevu vsázky teplem, které vzniká při spalování plyných paliv. K přenosu tepla ze spalin na vsázku dochází 3 způsoby:

- sáláním (např. spalin na vsázku nebo spalin na vyzdívku pece)
- konvekcí (prouděním spalin podél povrchu vsázky)
- vedením (vsázka je prohřívána z povrchu do vnitřku).

Tyto způsoby přenosu tepla se uplatňují současně. Problémem plynových pecí jsou vysoké ztráty tepla. Nejvíce se na nich podílí ztráta tepla odcházejícími spalinami tzv. komínová ztráta. Ta dosahuje až na hodnotu 70 % celkového tepla dodaného peci. Ztráty se snižují použitím výměníků tepla. V tab. 3 jsou uvedeny průměrné hodnoty účinností některých druhů plynových pecí, které se používají ve strojírenství. V tabulce č. 4 jsou účinnosti plynových pecí s využitím výměníku tepla.

Tab. 3 Plynové pece bez výměníku tepla [27]

Typ pece (technologický proces)	Teplota vsázky [°C]	Průměrná účinnost pece [%]
komorová (ohřev oceli)	1150	26
vozová (žhánání oceli)	950	28
kelímková tavící (Al)	730	30
vozová sušící	450	32

Tab. 4 Plynové pece s výměníkem tepla [27]

Typ pece	Teplota vsázky [°C]	Teplota spalin vzduchu [°C]	Průměrná účinnost pece [%]
vozová (žhánání oceli)	950	350	35
vozová (výpal porcelánu)	1380	850	58

Plynové průmyslové pece se používají zejména k tepelnému zpracování výrobků v hutnictví, strojírenství, sklářském a keramickém průmyslu. [25],[27]



Obr. 19 Vozová žihací pec [25]



Obr. 20 Komorová pec pro ohřev [25]

3.2 Elektrický ohřev

Z termodynamického hlediska je na první pohled efektivita přeměny elektrické energie na teplo nižší než u palivového procesu. U obou způsobů výroby technologického tepla se vychází ze základní suroviny, kterou mohou být uhlí, ropa, zemní plyn atd. U palivového procesu získáváme teplo přímo z této suroviny. Pokud převádíme elektrickou energii na teplo, dochází k několikanásobné transformaci energie, získané ze základní suroviny. Výsledná účinnost této přeměny závisí na účinnosti kotle, turbíny a generátoru. Z toho důvodu je důležité hodnotit efektivnost elektrického ohřevu individuálně podle požadované tepelné technologie. Elektrický ohřev lze na rozdíl od palivového realizovat několika možnostmi, kterým byla věnována celá kapitola 2.

Výhody elektrického ohřevu oproti palivovému ohřevu:

- nižší investiční náklady oproti palivovému ohřevu
- poměrně vysoká účinnost přeměny elektrické energie na teplo v pracovním prostoru viz následující tabulka

Tab. 5 Účinnost vybraných druhů elektrických ohřevů [7]

Druh ohřevu	Účinnost [%]
odporový ohřev	85 až 95
dielektrický ohřev	více než 50
indukční ohřev – tavící pec	80
indukční ohřev – ohříváč	75
obloukový ohřev	90

- malé náklady na údržbu
- snadná regulovatelnost (přepínáním, pulzním spínáním, řízením napětí)
- bezpečný provoz – bez plynu a ohně.

Nahrazením palivového ohřevu elektrickým dochází k:

- zvýšení produktivity, kvality výrobků a bezpečnosti
- snížení spotřeby energie, výrobních nákladů a ztrát materiálu (u plynového ohřevu vysoké ztráty)
- zlepšení využití materiálu a pracovních podmínek
- zabezpečení vysoké rychlosti ohřevu a vysoké hustoty tepelného výkonu
- využití moderních výrobních postupů
- zlepšení vlastností materiálu a surovin
- úspoře primární energie a zejména fosilních surovinových zdrojů, čímž je šetrnější i k životnímu prostředí (neprodukuje se spaliny)
- rozvoji nových technologií.

Nevýhody elektrického ohřevu oproti palivovému ohřevu:

- vyšší cena elektrické energie oproti jiným druhům energie
- lze předpokládat navyšování ceny za elektrickou energii. [7],[9]

V následující podkapitole se zaměřím na přednosti jednoho z nejpoužívanějších elektrických ohřevů, kterým je indukční ohřev.

3.2.1 Přednosti indukčního ohřevu

- teplo vzniká přímo v zahřívané vsázce
- vysoká hustota výkonu a rychlost ohřevu
- nastavení hloubky pronikání naindukovaných proudů do vsázky volbou frekvence
- přesné určení ohřívaného místa
- snadné řízení teploty ohřívané vsázky
- jednoduchost činnosti
- vysoká účinnost
- bezpečnost a dobré pracovní podmínky
- čistota a minimální negativní vliv na životní prostředí

Zejména vysokou rychlostí ohřevu, dobrým řízením teploty a přesným určením ohřívajícího místa se indukční ohřev odlišuje od plynového nebo odporového ohřevu. Indukční ohřev je i energeticky úspornější. Pokud se například nahradí při ohřevu ocelových součástí průběžná plynová pec o výkonu 100 kW vysokofrekvenčním generátorem se středním výkonem 25 kW, dochází ke snížení doby ohřevu. To je způsobeno tím, že energie potřebná pro ohřev, působí pouze na požadovaném místě.

Další výhody s sebou přinášejí i nové vysokofrekvenční polovodičové generátory. Oproti starším rotačním a elektronkovým generátorům mají:

- vyšší účinnost - 90 % oproti 40 až 50 % u starších elektronkových
- delší dobu životnosti
- nižší spotřebu chladicí vody
- okamžitý náběh do plného výkonu – u elektronkového je zapotřebí žhavit elektronku
- nižší náklady na opravy – elektronka tvoří až 2/3 pořizovací ceny generátoru. [4], [32]

3.3 Solární soustavy pro průmyslové aplikace

Okolo 30 % celkové spotřeby technologického tepla v průmyslu probíhá při teplotách do 100 °C, více než 50 % pak do 400 °C. K výrobě technologického tepla lze využít solární tepelné soustavy, které jako teplonosnou látku používají kapalinu nebo vzduch. Základem těchto soustav jsou solární kolektory. Solární soustavy se používají pro technologické aplikace, které probíhají při teplotách do 250 °C. Jsou to například:

- mytí a čištění – v potravinářském a textilním průmyslu, teplotní rozsah 40 až 80 °C
- sušení – teplotní rozsah 30 až 80 °C
- pasterizace – v potravinářském průmyslu, teplotní rozsah 80 až 110 °C
- přehřev vody - teplotní rozsah 30 až 90 °C
- destilace a chemické procesy - teplotní rozsah 120 až 250 °C
- ohřev náplní průmyslových van – teplota roztoku ve vanách 60 až 80 °C.

Solární soustavy pro výrobu technologického tepla využívají například ve výrobní hale na masné produkty ve španělském Montesanu, v německé firmě Steinbach & Vollmann zabývající se kovovýrobou nebo v německém pivovaru Lammsbräu. V Montesanu se využívá solární systém s plochou kolektorů 290 m² od roku 2008. Tento systém ohřívá vodu na teploty

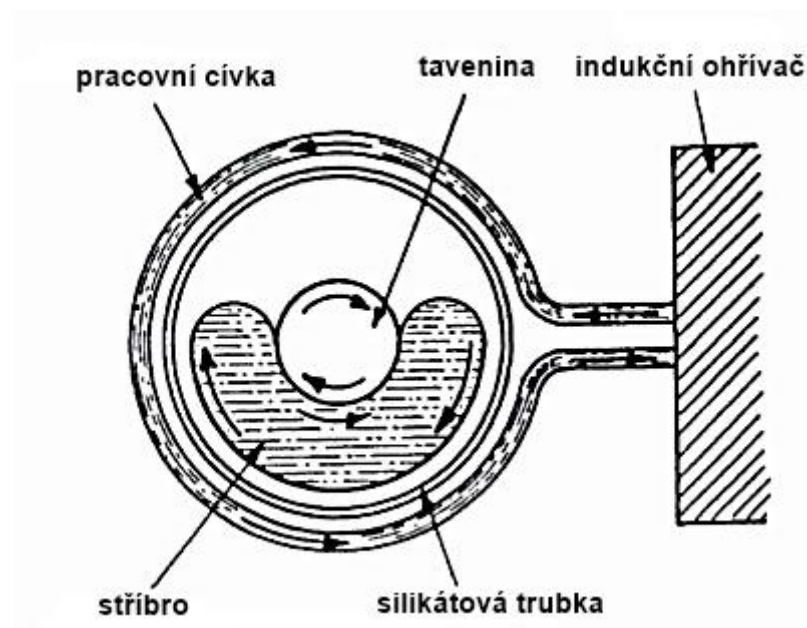
40 a 60 °C za účelem mytí a čištění. Náklady na vybudování činily 200 000 EUR. Ve firmě Steinbach & Vollmann se instalací solárního termického systému o ploše kolektorů 400 m² snížila spotřeba plynu o 30 až 35 %. Systém se zde používá k ohřevu průmyslových van, kde teplota roztoku dosahuje hodnoty 80 °C. Celkové náklady v tomto případě činily 240 000 EUR. V pivovaru Lammsbräu se pomocí teplovzdušných kolektorů přehřívá vzduch pro vysoušení ve sladovně.

Vzhledem k vysokým investičním nákladům se však ve velké míře solární soustavy v průmyslových aplikacích nevyužívají. Díky předpokládanému nárůstu cen energie ze standardních zdrojů (uhlí, zemní plyn, ropa) se s nimi počítá zejména do budoucna. [29], [30], [31]

4 Vysokoteplotní tavení materiálů

Předmětem této kapitoly je vysokoteplotní tavení elektricky vodivých materiálů. K vysokoteplotnímu tavení materiálů jsou nejvhodnější kelímkové indukční pece. Zmínka o těchto pecích je uvedena již v kapitole 2.7.1.1, kde uvádím kelímkovou indukční pec jako jednu z možných aplikací indukčního ohřevu. Kelímkové pece se využívají k tavení elektricky vodivých i nevodivých materiálů. Při tavení některých materiálů je zapotřebí dosáhnout vysoké teploty až okolo 3000 °C. Pro tyto materiály je nejvhodnější použití indukčního ohřevu v takzvaném studeném kelímku.

Historie studeného kelímku spadá až do roku 1931, kdy v německé firmě Siemens und Halske Company přišli s nápadem na tavení materiálu ve vodou chlazeném kelímku. V letech 1957 až 1961 provedli pánové Sterling a Warren pokus, při kterém tavili křemík ve vodou chlazeném kelímku ze stříbra.



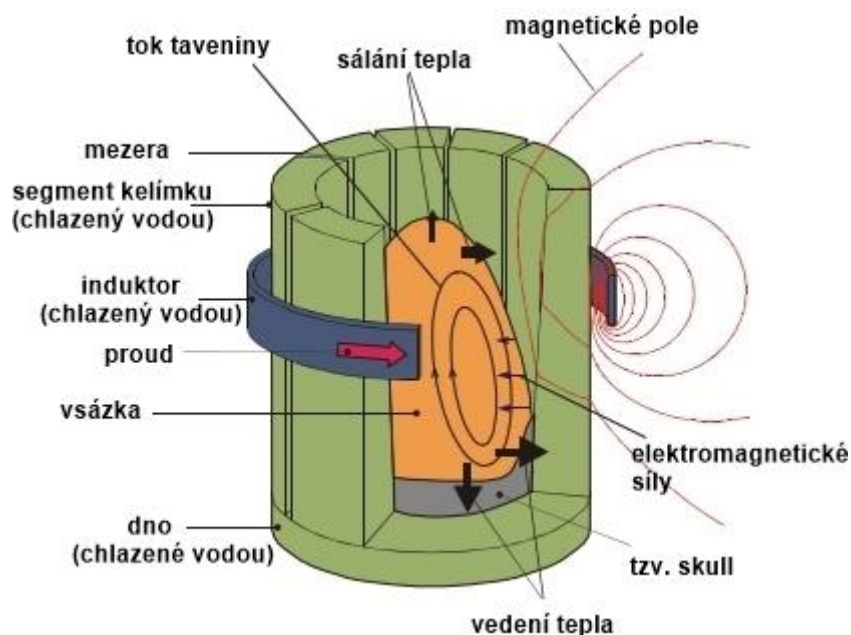
Obr. 21 Tavení křemíku ve stříbrném kelímku [33]

V roce 1969 Francouz J. Reboux získal patent na zpracování křemíku v indukčním studeném kelímku pro výrobu křemíkových bloků jako základního materiálu pro výrobu solárních článků. V roce 1985 použil T. F. Ciszek studený kelímek k odlévání křemíku pro solární články. Touto problematikou se zabývali vědci nejen v USA a Evropě (např. bývalé SSSR) ale také například v Japonsku. Od devadesátých let 20. století se začalo využívat studeného kelímku k tavení různých materiálů také v průmyslu. Díky svým fyzikálním a chemickým vlastnostem se začala používat slitina TiAl jako konstrukční materiál v automobilovém průmyslu. V současné době se využitím studeného kelímku zabývá řada pracovišť po celém světě. [2], [33]

4.1 Studený kelímek

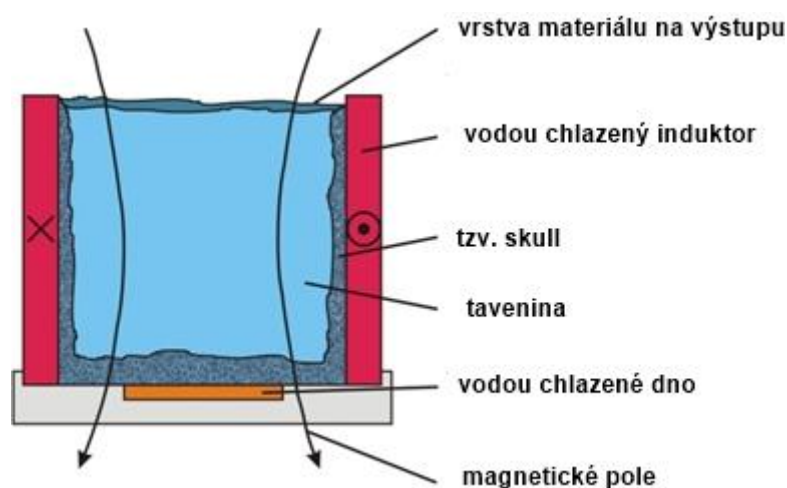
Metoda indukčního ohřevu ve studeném kelímku ISM (induction skull melting) se používá pro její výhody oproti jiným druhům ohřevů. Mezi hlavní z nich patří především možnost dosažení teploty potřebné pro tavení kovů s vysokou teplotou tavení a ochrana taveného materiálu před znečištěním. Studený kelímek se konstruuje ve dvou variantách. První možností je kelímek vytvořený z dutých měděných vodičů. Umístění cívky je v tomto případě stejné jako u indukčních kelímkových pecí. Druhou variantou je jednozávitový induktor tvořící přímo stěnu kelímku. Během indukčního ohřevu je kelímek neustále intenzivně chlazený vodou. Díky tomu si udržuje pracovní teplotu okolo 50 °C navzdory tomu, že teplota roztavené vsázky uvnitř kelímku může dosahovat teploty až 3000 °C. Velký rozdíl teplot mezi stěnami kelímku a taveným materiálem způsobí, že se na rozhraní kelímek – tavený materiál vytvoří tenká vrstva tuhé neroztavené vsázky, tzv. skull. Tato vrstva zabraňuje spojení kelímku s taveninou a chrání tak kelímek před roztavením. Nedochozí tudíž ani ke znečištění výsledného materiálu materiálem kelímku.

Indukční kelímková pec s vodou chlazenými stěnami na obr. 22 je vhodná pro tavení neželezných materiálů s vysokým bodem tání. Induktor se skládá z dutých měděných vodou chlazených segmentů. Napájení induktoru je z vysokofrekvenčního zdroje o kmitočtech 90 až 5000 kHz. Kelímkové pece tohoto typu se využívají například při výrobě oxido – keramických materiálů na bázi Ti nebo Al.



Obr. 22 Indukční pec se studeným kelímkem [34 - upraveno]

Indukční vysokofrekvenční pec pro tavení špatně elektricky vodivých materiálů je zobrazena na obr. 23. Stěny i dno induktoru jsou chlazené vodou. Na obrázku je vidět také tenká vrstva neroztavené vsázky tzv. skull, která chrání induktor a dno od vysoké teploty taveného materiálu. Tato pec je vhodná pro výrobu oxido – keramických a skleněných materiálů. Elektrická účinnost těchto pecí dosahuje více než 90 %. Naproti tomu účinnost tavení elektricky vodivých materiálů (kovů) dosahuje hodnot okolo 10 %. [2], [16], [35]



Obr. 23 Tavení elektricky slabě vodivých materiálů pomocí ISM [36 - upraveno]

4.2 Tavení elektricky nevodivých materiálů

Tavení ve studeném kelímku se nejvíce používá pro materiály se špatnou elektrickou vodivostí. Mezi tyto materiály patří různé oxidy kovů nebo sklo. Při pokojové teplotě dosahují tyto materiály velmi nízkých hodnot elektrické vodivosti (u skla se pohybuje mezi 10^{-15} až 10^{-11} S/m při 20 °C) a nelze je proto přímo indukčně ohřívat. Nastává tak problém s nastartováním jejich tavby. Existuje několik způsobů, jak startovací fázi provést. Nejčastěji používanou možností je přidání vhodného elektricky vodivého materiálu do vsázky. Tento materiál se pomocí elektromagnetické indukce roztaví. Od něj se pak začne tavit vsázka. Během tavení je však potřeba regulovat výkon přenášený do vsázky, aby se dosáhlo plynulého tavení. Na rozhraní taveného materiálu a kelímku se pak vytvoří slabá vrstva (tzv. skull), která chrání kelímek před poškozením. Během celého procesu tavení je kelímek intenzivně chlazený vodou.

Startovací materiál je třeba volit s ohledem na jeho chemické složení a fyzikální vlastnosti, aby nedocházelo ke kontaminaci vsázky. Takovým materiálem je například metalický zirkon, který se používá při tavení ZrO_2 .

Další možností startovacího materiálu je grafitový kroužek, který se používá například při tavení YBCO nebo skla. Kroužek se vloží do vsázky a po nastartování tavby se odstraní. K roztavení určité části vsázky je možné použít i některé jiné zdroje tepla. Jedná se například o plazmový hořák, laserový paprsek nebo plynový hořák. [2], [37]

4.3 Tavení elektricky vodivých materiálů

Studený kelímek se používá nejčastěji při tavení špatně elektricky vodivých materiálů, oxidů, keramiky nebo skla. Je však možné ho použít i pro tavení žárupevných kovů a jejich slitin, materiálů jako jsou titan, tantal, niob či materiálů na bázi TiAl (aluminidy titanu). Výhodou tavení elektricky vodivých materiálů ve studeném kelímku je absence startovací fáze. Na rozdíl od elektricky nevodivých materiálů stačí pro ohřev elektricky vodivých materiálů nižší frekvence.

Porovnání některých energetických a technologických parametrů při tavení kovových a nekovových materiálů metodou ISM je uvedeno v tab. 6. [37], [38]

Tab. 6 Porovnání metody ISM pro kovové a nekovové materiály [33]

Parametr	Kovy	Nekovové materiály
Teplota tavení	až 3400 °C	až 3880 °C
Elektrická konduktivita v roztaveném stavu	$(1 - 5) \times 10^6$ S/m	$(0,4 - 5) \times 10^3$ S/m
Frekvence	0,05 – 10 kHz	440 – 5280 kHz
Měrná spotřeba energie	0,6 – 10 kWh/kg	1,5 – 10 kWh/kg
Tloušťka krusty	velmi malá	2 – 20 mm
Atmosféra	ochranný plyn	vzduch nebo ochranný plyn
Startovací materiál	není vyžadován	je vyžadován
Elektrická účinnost	5 – 7 %	85 – 95 %

4.3.1 Tavení titanu

Titan patří mezi těžkotavitelné kovy s vysokou teplotou tavení. Díky svým výborným vlastnostem, jako je malá měrná hmotnost, tvrdost nebo odolnost proti korozi, se používá například v letectví, kosmickém průmyslu nebo při výrobě vysokopevnostních konstrukcí. Nevýhodou je jeho poměrně vysoká cena.

Slitiny titanu jsou velice reaktivní. Reagují s prvky, jako je kyslík, dusík nebo vodík. Z toho důvodu musí být taveny ve vakuu nebo jiné inertní atmosféře. K tavení titanu a jeho slitin se používají měděné kelímky chlazené vodou. Teplota tavení titanu se pohybuje okolo 1700 °C. Pokud by při tavení došlo ke kontaktu roztavené slitiny s chladicí vodou, hrozila by exploze. Proto musí systémy pro tavení titanu a jeho slitin splňovat nejpřísnější bezpečnostní předpisy.

V následujících podkapitolách se budu zabývat porovnáním přípravy slitin titanu pomocí vakuového obloukového tavení (metoda VAR) a indukčního tavení (metoda ISM) ve studeném kelímku. [38], [39]

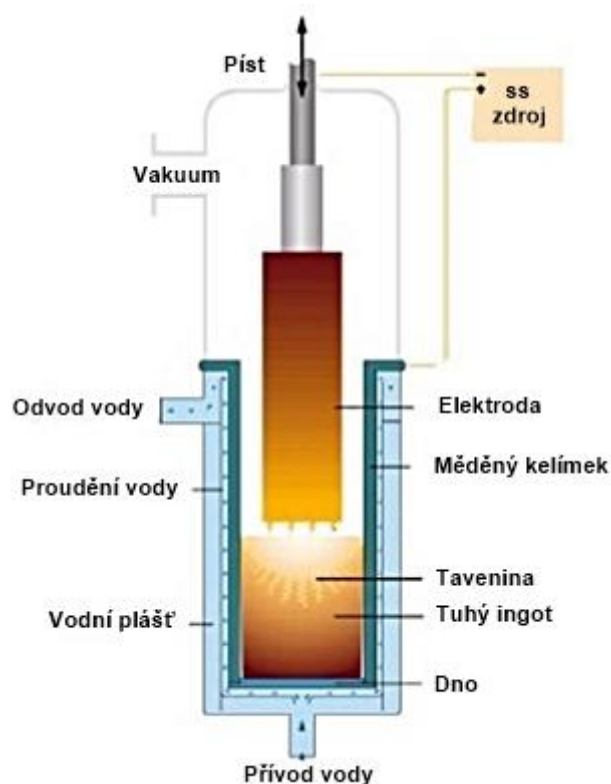
4.3.1.1 Tavení slitin titanu metodu VAR

Při vakuovém obloukovém tavení, které probíhá ve vodou chlazeném měděném kelímku, vzniká oblouk mezi odtavnou elektrodou z titanové slitiny a kousky z téže slitiny. Při

dosažení požadovaného množství roztaveného kovu se vytáhne elektroda a dojde k odlití kovu do připravené speciální formy. Formy jsou vyrobeny z nereaktivních materiálů, například ze zirkonia. Během celého procesu dochází k monitorování těsnosti vakua, rychlosti tavení a míchání taveniny. Nesmí dojít ke kontaminaci vakua vzduchem a vodou. Pokud by došlo ke kontaktu s vodou, hrozilo by nebezpečí exploze. Pro dosažení vyšší homogenity je důležité taveninu míchat. To provádí elektromagnetické pole, které vzniká díky pomocným induktorům, jimiž jsou pece vybaveny. Rychlost tavení u slitin typu Ti-17 nebo Ti-10V-2Fe-3Al se pohybuje okolo 5-6 kg/min. V poslední fázi tavení se rychlost v několika krocích snižuje. Tím se zabrání možnému vzniku vad.

Tavení touto metodou má svoje nevýhody. Především je to vysoká cena titanových elektrod. Vodou chlazený kelímek ovlivňuje tekutost kovu, což zhoršuje plnění tenkostěnných odlitků. Vliv na plnění forem má i vysoký teplotní gradient, ke kterému dochází v roztaveném kovu.

Pomocí této metody se připravují slitiny Ti-6Al-4V a ingoty titanu například o průměru až 100 cm a hmotnosti 10 až 15 tun. [38], [39]

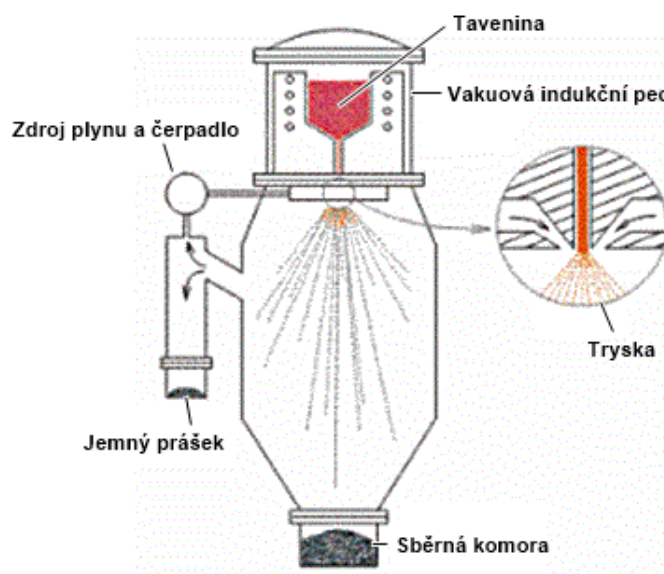


Obr. 24 Schéma pece pro vakuové obloukové tavení [38 - upraveno]

4.3.1.2 Tavení slitin titanu metodou ISM

Jedná se o novější metodu, kterou se zabývá několik pracovišť po celém světě. Při indukčním tavení slitin titanu se také využívá vodou chlazeného měděného kelímku. Celý proces probíhá ve vakuově utěsněné komoře. Kelímek je v tomto případě tvořen vodou chlazenými segmenty. Ve slitině umístěné uvnitř tohoto kelímku se proměnným elektromagnetickým polem naindukují vířivé proudy, které vsázku ohřívají. Jak se slitina titanu taví, dochází k jejímu tuhnutí u stěn kelímku a vytvoření tenké vrstvy na povrchu. Titan má nízkou tepelnou vodivost, takže tato vrstva izoluje roztavený kov od chladícího efektu kelímku. Díky vysokému příkonu roztavený kov v důsledku elektrodynamických sil částečně levituje, což snižuje množství tepla, které se vymění mezi taveninou a vytvořenou tenkou vrstvou (skull). Výsledkem toho je dosažení mnohem vyšších teplot. Pomocí naindukovaných vířivých proudů a elektrodynamických sil uvnitř kelímku dochází k míchání taveniny. Tím je zajištěna teplotní i materiálová homogenizace taveniny.

Na tavení metodou ISM je možné navázat odléváním, při kterém se získá produkt ve formě odlitku. Další možností je rozstříkávání taveniny v plynu, čímž se získá titan ve formě prášku. Při výrobě práškového titanu dojde po roztavení vsázky uvnitř vodou chlazeného měděného kelímku k natažení tenké vrstvy krusty uprostřed dna. Tímto otvorem pak protéká tekutý kov přes kovovou trysku. Na jejím konci je tekutý kov rozstříkáván ve vysokotlakém plynu na malé kapičky. Ty se během pádu chladicí věží mění v prášek.



Obr. 25 Princip výroby práškového titanu [40 – upraveno]

Tavení slitin titanu pomocí metody ISM má oproti tavení metodou VAR následující výhody:

- dosažení vyšší teploty a rovnoměrnější rozložení teploty, což obojí vede ke snadnějšímu zhotovení odlitku
- vsázka může mít v podstatě jakýkoliv tvar, který se vejde do kelímku - ingot, trubka, deska, houba, prášek nebo recyklovaný materiál
- je možné řídit obsah kyslíku, například přidáváním TiO_2 do tavené vsázky, což umožňuje řídit pevnost odlitků
- umožňuje držet vsázku v roztaveném stavu delší dobu a tím i roztavení kovů s vysokou teplotou tavení jako jsou např. wolfram nebo tantal
- kratší doba tavení vsázky (např. 30 kg vsázky za 20 minut)
- nižší náklady na výrobu odlitku. [38], [39], [44]

Tab. 7 Porovnání vybraných ukazatelů procesů ISM a VAR pro slitinu Ti-6Al-4V [38]

	ISM	VAR
Průměrný čas cyklu	6 min.	7,75 min.
Počet taveb za den	196,8	152,32
Odlévací hmotnost	7,3 kg	15 kg
Tavicí hmotnost	7,5 kg	15,3 kg
Spotřeba materiálu za rok	339 480 kg	536 021 kg
Hmotnost elektrody	-	129 kg
Využití odpadu	40 %	30 %

4.4 Přehled dalších výhod tavení ve studeném kelímku

- Možnost přípravy materiálů s vyšší teplotou tavení jako jsou titan, niob, tantal nebo materiálů na bázi TiAl pro technologie přesného odlévání. Tyto materiály se vyznačují nízkou měrnou hmotností, vysokou žáruvzdorností a pevností. Využívají se proto například při výrobě lopatek spalovacích turbín, lopatek kompresorů nebo výfukových ventilů v automobilových motorech.
- Teplo vzniká přímo v ohřivaném materiálu, což zvyšuje rychlost celého procesu ohřevu.
- Rozložení tepla ve vsázce lze měnit vhodnou volbou frekvence generátoru.
- Tavený materiál není v přímém kontaktu se stěnou kelímku nebo jinými materiály, které by mohly ovlivnit čistotu taveniny.
- Ve stejném kelímku je možné postupně tavit velké množství slitin, aniž by došlo k jejich vzájemné chemické kontaminaci.
- Vysoká kvalita výrobků, snadnější plnění forem při odlévání a kratší doba tavby jsou dosaženy intenzivním mícháním taveniny.
- Nahrazením keramického kelímku studeným kelímkem se ušetří čas potřebný na výměnu keramického kelímku, což vede k vyšší výrobnosti pece. [35], [36], [41], [42]

4.5 Využití studeného kelímku

Použití studeného kelímku přináší celou řadu výhod, které byly zmíněny v předchozích kapitolách. Díky nim nachází uplatnění ve stále více aplikacích. Vzhledem k vynikajícím fyzikálním vlastnostem, vysoké teplotní odolnosti a nízké měrné hmotnosti se používá titan a jeho slitiny například v automobilovém průmyslu k výrobě ventilů nebo turbodmychadel. V kelímku je možné zpracovávat těžkovitelné keramické materiály, které se používají v optice nebo elektrotechnice. Dají se v něm zkoumat vlastnosti tavenin na bázi oxidu železa, uranu nebo zirkonu, což umožňuje simulovat havárie v aktivní zóně jaderné elektrárny. Zónovou krystalizací při teplotě okolo 2800 °C je možné vyrobit syntetické diamanty. Ty se

pak používají ve šperkařském průmyslu jako náhrada pravým diamantů. Výhodou tohoto diamantu je těžká rozeznatelnost od skutečného diamantu, nízká cena a možnost dosažení různých barevných odstínů. V posledních letech se stále více zkoumá možnost použití studeného kelímku pro zpracování radioaktivního odpadu. Tímto tématem se zabývá několik pracovišť po celém světě. Jedním takovým je i u nás Ústav jaderného výzkumu v Řeži, kde používají studené kelímky k výzkumným účelům, simulaci havarijních stavů jaderných elektráren nebo vitrifikaci radioaktivního odpadu. [35], [36], [45]

4.5.1 Vitřifikace radioaktivního odpadu

Vitřifikace je proces zpracování radioaktivního odpadu do skelných nebo keramických matric, ve kterých je možné ho skladovat v hlubinných úložištích několik tisíc let. Tímto způsobem zpracování radioaktivního odpadu se zabývá i firma AREVA, která 17. dubna 2010 vyrobila první kontejner vitřifikovaného odpadu pomocí technologie studeného kelímku. Z vyhořelého jaderného paliva tvoří přibližně 4 % odpad. Zbytek je možné dalším zpracováním a recyklací opět použít k výrobě elektrické energie. Odpad je pak zpracován do skleněných matric a uložen do nádob z nerezové oceli. Princip studeného kelímku spočívá v tom, že se naindukuje elektrický proud přímo do skla s cílem zvýšit jeho teplotu, aniž by se ohřál kelímek.

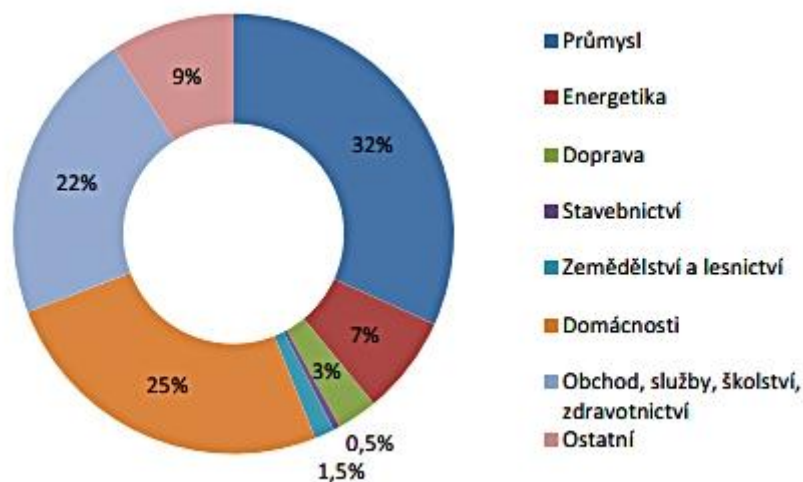
Výhody studeného kelímku:

- možnost zvýšit frekvenci vitřifikace (zeskelnění)
- prodloužení životnosti zařízení
- umožňuje vitřifikaci širšího sortimentu výrobků a redukuje objem konečného odpadu. [43]

5 Perspektiva elektrotepelných technologií

V současné době existuje stále více výrobních technologií, jež jsou závislé na použití elektrického tepla. Elektrotepelné technologie se navrhuji tak, aby splňovaly požadavky z hlediska hospodárnosti, účelnosti a efektivity. Neustále se proto pracuje na výzkumu a vývoji těchto technologií. Při přechodu z palivového tepla na teplo elektrické se z hlediska hospodárnosti snižují výrobní náklady, šetří pracovní síly, prostor a ve většině případů i spotřeba prvotní energie. Elektrotepelná zařízení musí pracovat také účelně a efektivně. K tomu přispívá to, že lze u těchto zařízení vytvářet matematické modely. Na základě výpočtů těchto modelů se pak nechá optimalizovat výrobní proces a dosáhnout tak vyšší kvality, nižších ztrát atd. Elektrotepelná zařízení zvyšují účinnost celého výrobního procesu, je možné u nich řídit rozložení teploty. Ke kladnému hodnocení přispívá i reprodukovatelnost procesu.

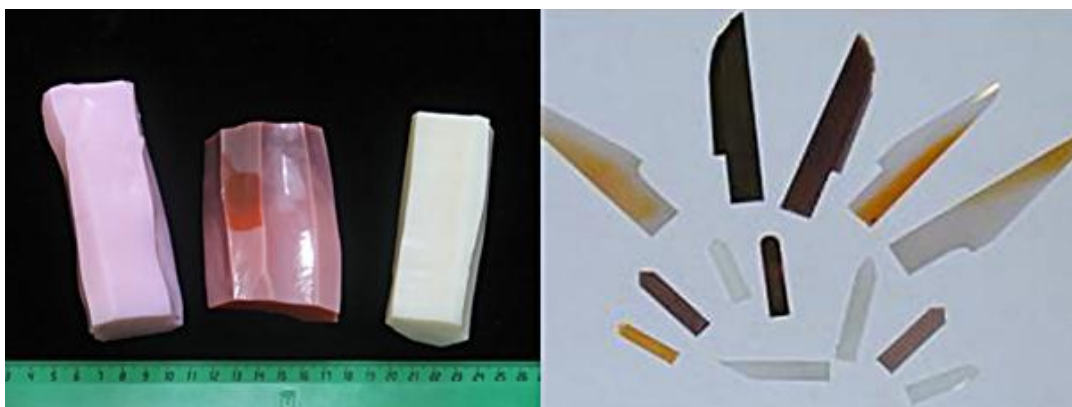
V moderních průmyslově vyspělých státech se 70 % až 80 % prvotní energie spotřebuje na technologické teplo a vytápění. Pro představu v letech 1975 až 1980 se na našem území (tehdejší ČSSR) vyrábělo okolo 70 TWh elektrické energie za rok. Z toho se 65 % energie spotřebovalo v průmyslu, 15 % v domácnostech, 10 % v oblasti služeb a obchodu, 5 % v dopravě a zbytek v zemědělství. Oproti tomu v roce 2014 se už vyrobilo okolo 86 TWh elektrické energie. Podíl sektorů národního hospodárství na spotřebě v roce 2014 je zobrazen na obr. 26.



Obr. 26 Spotřeba elektřiny v ČR 2014 [46]

Z tohoto obrázku je vidět, že elektrická energie je spotřebovávána zejména v průmyslu a domácnostech. V těchto oblastech pak velká část spotřeby připadá na výrobu tepla. V průmyslu se jedná o teplo technologické (elektrické pece, svařování, chemické procesy atd.). V oblasti elektrotepelných technologií vidím perspektivu především u studeného kelímku. Jeho využitím, jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, se zabývá mnoho pracovišť na celém světě. V Ústavu jaderného výzkumu v Řeži se zabývají tím, jak vhodně zpracovat a posléze naložit s radioaktivním odpadem. Ve studeném kelímku se testují nové materiály, které by mohly do budoucna pomáhat při haváriích v aktivních zónách jaderných elektráren. Cílem jednoho jejich programu je vytavit a následně ochladit stejné množství materiálu, jež se nachází v aktivní zóně. Díky kelímku je možné zkoumat možnosti efektivního využití vyhořelého radioaktivního paliva. V něm zůstává přes 90 % energie, které by se dalo ještě využít. Plány jsou takové, že by palivo bylo v kapalném skupenství na bázi taveniny fluoridových solí. Po prvním ozáření by z aktivní zóny oteklo, vyčistilo by se a přidala čerstvá složka. Poté by se palivo vrátilo zpět do procesu. Aktuální typy reaktorů však nejsou uzpůsobeny toto palivo využívat. Vzhledem k vysoké agresivitě fluoridových solí by bylo potřeba postavit reaktory nové. Jestli se podaří najít vhodné konstrukční materiály, je zatím otázkou budoucnosti.

Elektrotepelné technologie přispívají k neustálému zdokonalování vlastností a výrobě nových materiálů, které pak nacházejí uplatnění v mnoha oblastech. Pracuje se například na vývoji výrobků z krystalů částečně stabilizovaného oxidu zirkoničitého pro lékařské účely. Tyto krystaly se získávají při vysokofrekvenčním dielektrickém tavení ve studeném kelímku. Vyznačují se vysokou pevností, tvrdostí, odolností proti opotřebení, chemickou i biologickou inertností a dalšími výbornými vlastnostmi, díky kterým se hodí pro výrobu chirurgických nástrojů.



Obr. 27 Krystaly (vlevo) a z nich vyrobené nože (vpravo) [48]

Našlo by se mnoho aplikačních oblastí, ve kterých naleznou elektrotepelné technologie uplatnění i nadále. Takovým příkladem je i vysokofrekvenční dielektrické svařování, které je jedním z několika způsobů průmyslového svařování termoplastů. Nejvhodnějším plastem pro vysokofrekvenční svařování je PVC. Jedná se o plast s univerzálními vlastnostmi, u kterého se předpokládá růst výroby z 35 na 55 milionů tun v roce 2020. Vysokofrekvenční svařování se používá zejména k vytváření vysoce pevných, nepromokavých a ohebných krycích potahů, které nacházejí uplatnění v autodopravě, vojenské technice, letectví, výrobě nafukovacích hal a mnoha dalších. Jedná se o perspektivní techniku svařování termoplastů a to i díky tomu, že se výrobci snaží reagovat na ekologické výhrady k PVC.

Z těchto několika ukázek je vidět, že se o perspektivu elektrotepelných technologií nemusíme obávat.[1], [45], [47], [48]

5.1 Hodnocení elektrotepelných technologií pomocí kritéria 3E

Na základě poznatků z této diplomové práce bych zhodnotil elektrotepelné technologie z hlediska ekonomického, energetického a ekologického. Při tomto hodnocení je nutné uvažovat, že technologické teplo můžeme vyrobit buď přeměnou elektrické energie, nebo klasickým palivovým procesem.

a) ekonomické hledisko

Z ekonomického hlediska se jeví elektrický ohřev jako výhodnější oproti klasickému palivovému procesu. Jedním z hlavních důvodů jsou nižší investiční náklady. Další důvody, které ukazují na výhodnost elektrického ohřevu, jsou snížení spotřeby energie či pokles výrobních nákladů a ztrát.

b) energetické hledisko

Palivový ohřev můžeme hodnotit například podle efektivnosti paliva. Z tabulky výhřevnosti paliv na straně 38 je zřejmé, že mezi vhodná paliva patří zemní plyn a ropa. Jelikož zásoby ropy se odhadují na zhruba 40 let, je z tohoto hlediska nejvhodnější použití zemního plynu. Ten umožňuje i přesné nastavení a regulování ohřívací teploty. Jeho největší nevýhodou jsou tepelné ztráty. Elektrickým ohřevem tyto ztráty eliminuje. U elektrického ohřevu hodnotíme z energetického hlediska účinnost přeměny elektrické energie na teplo

nebo možnost regulace teploty. Mezi nejpoužívanější způsob elektrického ohřevu patří indukční ohřev, který vyniká právě vysokou účinností, rychlostí ohřevu, možností řídit teplotu a přesným určením místa ohřevu.

Přeměna elektrické energie na teplo v odporových zařízeních se využívá kromě technologických účelů také pro vytápění budov. V tomto případě se hodnotí spotřeba primární energie. Je zaveden tzv. faktor energetické přeměny, který udává přepočtenou spotřebu energie v budově na množství primární energie. Podle spotřeby primární energie se pak posuzuje energetická náročnost budov. [49]

Tab. 8 Faktor energetické přeměny [50]

Zdroj	Faktor energetické přeměny [kWh/kWh]
Zemní plyn a další fosilní paliva	1,1
Elektrická energie	3

c) ekologické hledisko

Technologické teplo se využívá v různých odvětvích průmyslu. Z nichž mezi největší znečišťovatele životního prostředí bych zařadil hutní průmysl a strojírenství. Ať už se jedná o palivový proces nebo elektrický ohřev, na začátku obou dochází většinou ke spalování základní suroviny (uhlí, ropa, zemní plyn). Spalováním těchto fosilních paliv dochází ke vzniku škodlivých emisí. Jedná se o tzv. skleníkové plyny (oxidy uhlíku, dusíku a síry). Možností jak se těchto nebezpečných látek zbavit u elektrického ohřevu je například použití vhodných obnovitelných zdrojů energie (např. energie větru, slunečního záření nebo vody). Z ekologického hlediska se jeví jako nejlepší možnost pro výrobu technologického tepla použití solárních soustav, o kterých jsem se zmínil v kapitole 3.3.

Dále bych také zohlednil vliv technologického procesu na pracovní prostředí respektive na pracovníky. Při palivovém procesu je potřeba rozlišovat o jaké palivo se jedná. Při použití plyných paliv probíhá provoz čistě, opakem toho jsou paliva tuhá. Také u elektrického ohřevu je zajištěn čistý a zároveň bezpečný provoz.

Závěr

Předkládanou diplomovou prací jsem rozdělil podle bodů v zadání do pěti hlavních kapitol. Abych v práci dodržel určitou strukturu, bylo potřebné začít krátkou kapitolou, která objasňuje pojem technologické teplo. Toto teplo je možné získat pomocí různých zdrojů, jimž jsem se věnoval v následujících kapitolách. Nejprve jsem pomocí odborné literatury přehledně uvedl používané elektrotepelné technologie od klasických až po moderní. U každé technologie jsem popsal princip vzniku technologického tepla a jejich možné použití v praxi. Na konci této kapitoly jsem řešil příklad týkající se vhodné volby kmitočtu při indukčním ohřevu. Měl jsem za úkol spočítat ohřev tyčových přířezů z nemagnetické oceli a ověřit, zda při indukčním ohřevu vypočítanou frekvencí nedojde k elektromagnetické průzařnosti vsázky. Při volbě kmitočtu je důležité dodržet určitý poměr mezi poloměrem vsázky a hloubkou vniku. Z toho důvodu jsem vycházel ze vztahu odvozeného z rovinného vlnění, kde teplo vzniklé na poloměru r_2 je přibližně $3a_2$. Po získání potřebného kmitočtu jsem zjistil, že přibližně 83 % elektromagnetické energie se ve válcové vsázce přemění na teplo. Pokud bych chtěl toto číslo zvětšit a zvolil vyšší kmitočet, zmenšila by se velikost hloubky vniku oproti poloměru vsázky a narostly by ztráty vyzařováním do okolí.

Ve třetí kapitole jsem se dostal k hlavnímu cíli mé práce, kterým už podle názvu „Přednosti elektrotepelných technologií“ bylo porovnání zdrojů technologického tepla a poukázání na výhody jednoho z nich, a to elektrické energie. Ta se v současné době stále více upřednostňuje nejen z důvodu klesajících zásob fosilních paliv. Elektrická energie z hlediska ekonomického není nejlevnější variantou oproti jiným druhům energie a navíc se dá předpokládat navyšování její ceny. Naopak z energetického a ekologického hlediska elektrická energie vítězí nad ostatními zdroji technologického tepla. Oproti palivovému ohřevu přináší celou řadu výhod popsaných v této kapitole. Do budoucna nelze opomíjet ani využití sluneční energie, která se zatím při současných cenách fosilních paliv nevyplácí.

Dalším bodem mé práce bylo popsat aplikaci elektrotepelné technologie, která se používá pro vysokoteplotní tavení elektricky vodivých materiálů. Jelikož potřebujeme u některých materiálů dosáhnout teploty až okolo 3000 °C, je nejvýhodnější použít tzv. studený kelímek. Ten nejenže umožňuje dosažení takto vysokých teplot, ale navíc chrání tavený materiál před znečištěním. Studený kelímek je vhodnější pro tavení elektricky nevodivých materiálů, kde dokáže pracovat s účinností přes 90 %. Ačkoliv je u elektricky vodivých materiálů účinnost mnohokrát nižší, studený kelímek lze použít. Jako příklad tavení elektricky vodivých materiálů popisuji tavení titanu.

V poslední kapitole jsem měl posoudit perspektivu elektrotepelných technologií. Jako nejvíce perspektivní technologii do budoucna vidím studený kelímek. Již nyní se pracuje na výzkumu možného využití studeného kelímku pro zpracování radioaktivního paliva. Vytváří se výrobky z krystalů částečně stabilizovaného oxidu zirkoničitého pro lékařské účely, které se oproti stávajícím materiálům vyznačují vysokou pevností, tvrdostí, odolností a dalšími výbornými vlastnostmi. Další velmi perspektivní oblastí je vysokofrekvenční dielektrické svařování plastů. Jen u takového PVC se předpokládá nárůst jeho roční výroby o 20 milionů tun do roku 2020.

Z této diplomové práce tedy vyplývá, že o technologickém teple a jeho využití neslyšíme naposled.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] RADA, Josef a kol. *Elektrotepelná technika*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985. 344 s.
- [2] ROT, D. a KOŽENÝ, J. *Modelování startu tavby oxidů kovů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku*. [online]. Electroscopie, 2010. [cit. 2. prosince 2015]. Dostupné z: <https://dspace.zcu.cz/bitstream/handle/11025/592/r4c4c1.pdf?sequence=1>
- [3] LANGER, Emil. *Teorie indukčního a dielektrického tepla*. 1. vyd. Praha: Československá akademie věd, 1964. 291 s.
- [4] LANGER, Emil, KOŽENÝ, Jiří. *Elektrotepelná zařízení indukční: Základy teorie, výpočty a konstrukce*. Plzeň: Vysoká škola strojní a elektrotechnická, 1982. 185 s.
- [5] NOVÁK, Pavol. *Základy teórie elektrických ohrevov*. 1. vyd. Košice: Rektorát Technické univerzity, 1991. 138 s. ISBN 80-7099-092-9
- [6] HRADÍLEK, Zdeněk, LÁZNIČKOVÁ, Ilona, KRÁL, Vladimír. *Elektrotepelná technika*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 2011. 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9
- [7] 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
- [8] VRÁNA, Václav. *Elektrické teplo*. [online]. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2008. [cit. 2. září 2015]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FMMI/Prednasky/TEPLO_bc_08.pdf
- [9] *Elektrické zdroje tepla*. [online]. [cit. 9. září 2015]. Dostupné z: http://kke.zcu.cz/old_web/_files/projekty/enazp/09/MMP/053_Elektricke_zdroje_tepla_-_PO.ppt
- [10] ČERNÝ, Václav. *Elektrický ohřev - odporový, dielektrický, obloukový, elektronový a laserový*. [online]. [cit. 9. září 2015]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/elektricky-ohrev-odporovy-dielektricky-obloukovy-elektronovy-a-laserovy-5--13708>
- [11] OSRAM. [online]. [cit. 10. září 2015]. Dostupné z: http://www.osram.cz/osram_cz/pouziti/prumyslove-aplikace/suseni-nateru/index.jsp
- [12] ČERNÝ, Václav. *Elektrický ohřev mikrovlnný*. [online]. [cit. 13. září 2015]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/elektricky-ohrev-mikrovlnny-7--13616>
- [13] CEBORA. [online]. [cit. 15. září 2015]. Dostupné z: <http://www.hstcebora.cz/katalog/plazmove-rezani/>
- [14] MLČÁK, Tomáš. *Elektrotechnika pro FMMI*. [online]. 1. vyd. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2010. 54 s. ISBN 978-80-248-2601-1. [cit. 16. září 2015]. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FEI/EFMMI/Elektrotechnika%20pro%20FMMI.pdf>
- [15] Poznámky z přednášek: Základy elektrotepelných procesů. 2013
- [16] ČERNÝ, Václav. *Indukční ohřev (3)*. [online]. [cit. 12. října 2015]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/indukcni-ohrev-3--14655>

- [17] *ROBOTERM*. [online]. [cit. 18. října 2015]. Dostupné z: <http://www.roboterm.cz/reference/indukcni-ohrivace/specialni-ohrivace/sor-120-20>
- [18] VÁCLAVÍK, M. *Povrchové kalení*. [online]. [cit. 18. října 2015]. Dostupné z: http://www.spssvsetin.cz/index_htm_files/dumy/19/VY_32_INOVACE_19_16.pdf
- [19] ČERNÝ, Václav. *Indukční ohřev (4)*. [online]. [cit. 18. října 2015]. Dostupné z: <http://www.4-construction.com/cz/clanek/indukcni-ohrev-4/>
- [20] *Technologie I. – pájení*. [online]. [cit. 18. října 2015]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/materialy/cvi%C4%8Den%C3%AD13_prezetace.pdf
- [21] *Aplikace indukčního ohřevu*. [online]. [cit. 18. října 2015]. Dostupné z: http://www.pcom.cz/EFD_Aplikace.htm
- [22] *Energie z fosilních paliv* [online]. [cit. 30. října 2015]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/pro-media-2014/05-kveten/encyklopedie_fosilni-paliva_e.pdf
- [23] *Výroba elektrické energie* [online]. [cit. 30. října 2015]. Dostupné z: http://vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=vyroba_elektricke_energie&site=energie
- [24] KRAUS, V. *Tepelné zpracování a slinování* [online]. [cit. 31. října 2015]. Dostupné z: <http://tzs.kmm.zcu.cz/TZSprcelk.pdf>
- [25] FÍK, Josef. *Plynové spotřebiče (III)* [online]. [cit. 31. října 2015]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2039-plynove-spotrebice-iii>
- [26] *Výhřevnosti paliv* [online]. [cit. 31. října 2015]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/11-vyhrevnosti-paliv>
- [27] FÍK, Josef. *Hospodárný provoz průmyslových plynových spotřebičů* [online]. [cit. 1. listopadu 2015]. Dostupné z: <http://www.prumyslovepece.eu/uspory-energie.htm>
- [28] *E-THERM technologická zařízení* [online]. [cit. 1. listopadu 2015]. Dostupné z: <http://www.ethermtz.cz/>
- [29] *Solární technologické teplo* [online]. [cit. 7. listopadu 2015]. Dostupné z: http://www.eccb.cz/fotos/_s_537SO-PRO-web.pdf
- [30] MATUŠKA, Tomáš. *Solární soustavy pro průmyslové aplikace* [online]. [cit. 7. listopadu 2015]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/144-solarni-soustavy-pro-prumyslove-aplikace>
- [31] *Solární soustavy* [online]. [cit. 7. listopadu 2015]. Dostupné z: <http://www.solarnispolecnost.cz/cz/solarni-soustavy>
- [32] *Indukční ohřev* [online]. [cit. 8. listopadu 2015]. Dostupné z: <http://www.rajmont.cz/technologie-indukcni-ohrev/>
- [33] MÜHLBAUER, Alfred. *History of Induction Heating and Melting*. Essen: Vulkan, 2008. 202 s. ISBN 978-3-8027-2946-1
- [34] UMBRASHKO, Andrejs a kol. *Experimental investigations and numerical modelling of the melting process in the cold crucible* [online]. [cit. 27. ledna 2016]. Dostupné z: http://www.modlab.lv/publications/2005/Padova_LES.pdf

- [35] *Laboratoř studených kelímků* [online]. [cit. 27. ledna 2016]. Dostupné z: <http://susen2020.cz/vyzkum/vyhled-2015-infrastruktura-projektu-susen/laborator-studenych-kelimku/>
- [36] *Induktives Skull-Melting von innovativen Materialien* [online]. [cit. 27. ledna 2016]. Dostupné z: https://www.etp.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/Broschuere_Skull.pdf
- [37] ZAJACOVÁ, Nikola. *Vysokoteplotní tavení materiálů ve studeném kelímku*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. ZČU Fakulta elektrotechnická.
- [38] LOSERTO VÁ, Monika. *Technologie speciálních slitin*. [online]. 1. vyd. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2013. 170 s. ISBN 978-80-248-3379-8. [cit. 28. ledna 2016]. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/03_Materialov%C3%A9_inzenyrstvi/07_Technologie_specialnich_slitin/Losertova_Technologie_specialnich_slitin.pdf
- [39] ASHTON, M. C. *Induction Skull Melting (ISM) of Titanium Alloys*. [online]. [cit. 28. ledna 2016]. Dostupné z: <http://www.castingstechnology.com/ismtialloys.asp>
- [40] *Gas – Atomization*. [online]. [cit. 2. února 2016]. Dostupné z: <http://amt-advanced-materials-technology.com/processing/gas-atomization/>
- [41] *Indukční tavení Skull-Melting-Technik*. [online]. [cit. 2. února 2016]. Dostupné z: <http://ihned.cz/c1-16611830-indukcni-taveni-skull-melting-technik>
- [42] *Indukční tavení v chlazeném kelímku (ISM)*. [online]. [cit. 2. února 2016]. Dostupné z: <http://www.aceso.cz/indukcni-taveni-v-chlazenem-kelimku-ism>
- [43] *THE COLD CRUCIBLE: A WORLD FIRST FOR HIGH-LEVEL WASTE*. [online]. [cit. 2. února 2016]. Dostupné z: <http://www.aveva.com/EN/operations-3400/the-cold-crucible-a-world-first-for-highlevel-waste.html#tab=tab3>
- [44] *Induction Skull Melting Furnaces*. [online]. [cit. 2. února 2016]. Dostupné z: <http://www.consarc.com/wp-content/uploads/sites/11/2014/12/ism.pdf>
- [45] *Podivuhodný kelímek*. [online]. [cit. 3. února 2016]. Dostupné z: <http://www.3pol.cz/cz/rubriky/jaderna-fyzika-a-energetika/608-podivuhodny-kelimek>
- [46] *Roční zpráva o provozu ES ČR 2014*. [online]. [cit. 5. února 2016]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2014.pdf/933fc41a-ad79-4282-8d0f-01eb25a63812
- [47] STEIDL, Josef. *Perspektivy vysokofrekvenčního svařování termoplastů*. [online]. [cit. 9. února 2016]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/perspektivy-vysokofrekvencniho-svarovani-termoplastu.html>
- [48] *Разработка изделий из частично стабилизированного диоксида циркония*. [online]. [cit. 9. února 2016]. Dostupné z: <http://www.aetechnologies.ru/dev/12-details.htm>
- [49] *Hodnocení environmentální kvality budov*. [online]. [cit. 20. dubna 2016]. Dostupné z: file:///C:/Users/Uzivatel/Downloads/Hodnoceni_environmentalni_kvality_budov.pdf
- [50] *Metodika hodnocení nízkoenergetických rodinných domů*. [online]. [cit. 2. dubna 2016]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/5088-metodika-hodnoceni-nizkoenergetickyh-rodinnych-domu>