

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra Elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Přímý odporový a indukční ohřev hliníkových tyčí

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří AUERMÜLLER**
Osobní číslo: **E12N0112P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Přímý odporový a indukční ohřev hliníkových tyčí**
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. Popište možnosti ohřevu tyčí odporovým přímým ohřevem a ohřevem indukčním za účelem tváření za tepla.
2. Uveďte stručné teoretické základy daných ohřevů. Navrhněte ohřevy pro tyče o průměru 0,010 m a délce 1,0 m.
3. Aplikaci provedte na ohřev Al - tyče o průměru 0,010 m a délce 1,0 m.
4. Porovnejte oba druhy ohřevu a stanovte závěry pro praxi.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 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: **14. října 2013**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**


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




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

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na přímý odporový a indukční ohřev hliníkových tyčí od průměru 10 mm a délce 1 m. Práce zahrnuje stručné teoretické základy obou ohřevů, dále pak návrhy výpočtů přímého odporového a indukčního ohřevu za účelem tváření za tepla. V poslední části je provedené zhodnocení výsledků a stanovení závěrů pro praxi.

Klíčová slova

Přímý odporový ohřev, Indukční ohřev, hliníkové tyče, frekvence, příkon, proud.

Abstract

This diploma thesis focused on the direct resistive and inductive heating aluminum bars of diameter 10 mm and length of 1 m. The work includes a theoretical foundations of both heats, then draft calculation of direct resistance and induction heating for hot forming. Finally, an evaluation of the results and drawing conclusions for practice.

Key words

Direct resistance heating, induction heating, aluminum bars, frequency, power input, power.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 11.5.2014

Jiří Auermüller

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc., za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Stanislavovi Jiřincovi za konzultace k diplomové práci.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	8
SEZNAM SYMBOLŮ	9
ÚVOD	11
1 ODPOROVÁ ELEKTROTEPELNÁ ZAŘÍZENÍ	12
1.1 PŘÍMÝ ODPOROVÝ OHŘEV	12
1.1.1 <i>Ohřev dlouhých kovových tyčí, drátů pásů apod.</i>	13
1.1.2 <i>Další možnosti použití přímého odporového ohřevu.</i>	17
2 TEORETICKÉ ZÁKLADY INDUKČNÍHO OHŘEV	22
2.1 PRINCIP INDUKČNÍHO OHŘEVU	23
2.2 ODVOZENÍ ROVNIC PRO ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO VLNĚNÍ	24
HLAVNÍ APLIKAČNÍ OBLASTI INDUKČNÍHO OHŘEVU JSOU [3] :	26
3 VÝPOČET POTŘEBNÉ ENERGIE PRO PŘÍMÝ ODPOROVÝ OHŘEV	27
3.1 NÁVRH ANALYTICKÉHO VÝPOČTU	27
3.2 ANALYTICKÝ VÝPOČET	29
4 VÝPOČET POTŘEBNÉ ENERGIE PRO INDUKČNÍ OHŘEV	31
4.1 VÝPOČET INDUKČNÍHO OHŘEVU POMOCÍ INDUKČNÍ OHŘÍVAČKY [2]	32
4.2 ÚVAHA O PRŮŘEZU VODIČE	39
ZÁVĚR	40
LITERATURA	41
SEZNAM PŘÍLOH	42

Seznam použitých obrázků

OBR.1.1: PŘÍMÝ ODPOROVÝ OHŘEV TYČÍ (PŘEVZTATO Z [1])	13
OBR. 1.2: PRŮBĚHY PŘÍKONU, TEPLoty A ZTRÁT PŘI PŘÍMÉM ODPOROVÉM OHŘEVU OCELOVÉ TYČE (PŘEVZTATO Z [1])	14
OBR. 1.3: ČASOVÉ PRŮBĚHY TEPLoty PŘI OHŘEVU OCELOVÉ TYČE (PŘEVZTATO Z [1]).....	15
OBR. 1.4: MĚRNÉ SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE (PŘEVZTATO Z [1]).....	16
OBR. 1.5 SCHÉMA ZAŘÍZENÍ PRO PRŮBĚŽNÝ OHŘEV DRÁTU (PÁSU) - 1OHŘÍVANÝ DRÁT (PÁS), 2 REGULAČNÍ TRANSFORMÁTOR, 3 Kladky A PŘÍVODY (PŘEVZTATO Z [1])	16
OBR. 1.6: ACHESONOVA GRAFITAČNÍ PEC - 1 DNO PECE, 2 ČELNÍ STĚNY, 3 GRAFITOVÉ BLOKY, 4 VÍKO PECE, 5 VSÁZKA, 6 ZÁSYPOVÁ SMĚS, 7 REGULAČNÍ TRANSFORMÁTOR (PŘEVZTATO Z [1]).....	17
OBR. 1.7: ELEKTRODOVÁ SKLÁŘSKÁ VANA - 1 PROSTOR PRO TAVENÍ SKLA, 2, 3 ELEKTRODY V PRACOVNÍM PROSTORU, 4 TAŽNÉ ZAŘÍZENÍ, 5 ELEKTRODY V TAVICÍM PROSTORU (PŘEVZTATO Z [1]).....	18
OBR. 1.7: ELEKTROLYZÉR NA VÝROBU HLINÍKU - 1 TUHOVÝ KATODOVÝ BLOK VANY, 2 OCELOVÝ PLÁŠŤ ZE ŽEBRY, 3 ELEKTRODY, 4 ELEKTROLYT, 5 TAVENÝ SUROVÝ HLINÍK (PŘEVZTATO Z [1]).....	19
OBR. 1.9: KATODOVÝ OHŘEV - 1 OHŘÍVANÁ SOUČÁST, 2 ELEKTROLYT, 3 KOVOVÁ NÁDOBA (PŘEVZTATO Z [1]) ...	20
OBR. 1.12: ELEKTROSTRUSKOVÉ PŘETAVOVÁNÍ OCELI - 1 ELEKTRODA, 2 ROZTAVENÁ STRUSKA, 3 PŘETAVENÝ INGOT, 4 KRYSTALIZÁTOR, 5 CHLADÍCÍ VODA, 6 OBJÍMKA ELEKTRODY, 7 ZAŘÍZENÍ K POSUVU ELEKTRODY (PŘEVZTATO Z [1]).....	21
OBR. 2.1: NÁHRADNÍ SCHÉMA INDUKČNÍHO OHŘEVU (PŘEVZTATO Z [9]).....	22
OBR. 2.2: PRINCIP INDUKČNÍHO OHŘEVU (PŘEVZTATO Z [3]).....	23
OBR. 4.1: SCHÉMA INDUKČNÍHO PROHŘÍVACÍHO ZAŘÍZENÍ (PŘEVZTATO Z [2])	31

Seznam symbolů

značka	veličina	Jednotka
a	hloubka vniku naindukovaných proudů	[m]
ρ_1	měrný odpor mědi	[$\Omega.m$]
a_2	hloubka vniku do vsázky	[m]
c_p	měrná tepelná kapacita	[$J.kg^{-1}.K^{-1}$]
d_1	vnitřní průměr induktoru	[m]
d_2	vnější průměr vsázky	[m]
d_C	náhradní průměr cívky	[m]
E	energie	[J]
\bar{E}	intenzita elektrického pole	[$V.m^{-1}$]
F	funkce poměrů délek a průměrů	[-]
G	hmotnost	[kg]
\bar{H}	intenzita magnetického pole	[$A.m^{-1}$]
I_{EF}	efektivní hodnota proudu	[A]
I_1	proudu v cívce	[A]
L_1	indukčnost cívky	[H]
l_1	délka induktoru	[m]
l_2	délka vsázky	[m]
L_N	indukčnost náhradní vsázky	[H]
L_{N1}	přepočtená vlastní indukčnost náhradní vsázky	[H]
m	hmotnost vsázky	[kg]
M	vzájemná indukčnost	[H]
N_1	počet závitů cívky	[-]
P	elektrický výkon	[W]
p	převodní poměr	[-]
P_C	celkový elektrický výkon	[W]
Q_N	jakost obvodu náhradní vsázky	[-]
R	odpor materiálu	[Ω]
r	poloměr	[m]
r_1	vnitřní poloměr induktoru	[m]

R_1	odpor cívky	$[\Omega]$
r_2	poloměr vsázky	$[m]$
R_N	odpor náhradní vsázky	$[\Omega]$
r_N	náhradní poloměr vsázky	$[m]$
R_{N1}	přepočtený odpor náhradní vsázky	$[\Omega]$
t	doba ohřevu	$[sec]$
T_0	počáteční teplota	$[K]$
T_k	konečná teplota	$[K]$
U_G	napětí generátoru	$[V]$
w_S	měrná spotřeba energie	$[kWh.kg^{-1}]$
x_2	argument hloubky vniku	$[-]$
Z_{N1}	přepočtená náhradní impedance vsázky	$[\Omega]$
α_1	Nagaokův součinitel pro cívku	$[-]$
α_2	Nagaokův součinitel pro vsázku	$[-]$
ΔT	rozdíl teplot	$[K]$
η_{el}	elektrická účinnost	$[-]$
η_{tep}	tepelná účinnost	$[-]$
μ_0	permeabilita vakua	$[4\pi \cdot 10^{-7} [H.m^{-1}]]$
μ_r	relativní permeabilita	$[-]$
ρ	rezistivita	$[\Omega.m^{-1}]$
ω	úhlová frekvence	$[s^{-1}]$
γ	konduktivita	$[S.m^{-1}]$

Vektory jsou psány tučně kurzívou (\mathbf{E} , \mathbf{H})

Úvod

V dnešní době si nedokážeme přestavit život bez elektrické energie. Použití elektrické energie je velmi rozmanité. Jedno z mnoha použití je např. v elektrotepelné technice.

Elektrické teplo zvyšuje produktivitu práce, jakost výrobků, zhodnocuje materiály a suroviny, snižuje výrobní náklady a výrazně zlepšuje pracovní a životní prostředí. Některé nejmodernější technologie jsou právě založeny na použití elektrického tepla. Např. v automobilovém průmyslu, v jaderné energetice, ve sklářském průmyslu, výroba a zpracování plastů, skleněných vláken, při výrobě hliníku i v elektronice, ale i v domácnostech jako např. tepelné spotřebiče na vaření, na vytápění místností, na ohřev užitkové vody. Mezi tyto spotřebiče patří sporáky, elektrické trouby, plotýnkové vařiče apod.

Elektrotepelná zařízení většinou odebírají energii jen v době, kdy pracují, tím ušetří mnoho energie oproti velkým palivovým zařízením, která spotřebovávají palivo i v nepracovních směnách.

První elektrotepelná zařízení byla poměrně jednoduchá odporová a oblouková zařízení.

Dnes elektrotepelná zařízení tvoří rozsáhlý samostatný technický obor. Vyplývá to z toho, jaké máme zařízení podle principu přeměny energie na teplo: odporová zařízení, indukční zařízení, dielektrická zařízení, oblouková zařízení, plazmová zařízení, elektronová zařízení a laserová zařízení.

Předkládaná práce je zaměřena na přímý odporový a indukční ohřev hliníkových tyčí. V práci se budu zabývat porovnáním přímého odporového a indukčního ohřevu hliníkové tyče o průměru 0,010 m a délce 1,0 m.

Nejdříve se zaměřím na teoretické základy přímého odporového a následně indukčního ohřevu a na jejich další využití. Dále budu popisovat teoretický návrh výpočtů pro jednotlivé ohřevy a v další části provedu jejich číselný výpočet. Poslední kapitola bude obsahovat porovnání přímého odporového a indukčního ohřevu podle vypočtených hodnot. Budou stanoveny závěry pro praxi a další detaily, které mají vliv na kvalitu, rychlost a ekonomičnost provozu.

1 Odporová elektrotepelná zařízení

V odporových elektrotepelných zařízeních se mění elektrická energie na tepelnou podle Joulova zákona: jestliže proud prochází vodičem, vzniká ve vodiči teplo. Teplo se předává do okolí za současného růstu teploty ve vodiči. Množství tohoto tepla je úměrné elektrickému odporu a druhé mocnině proudu vodiče. [1]

$$P = R * I_{ef}^2$$

kde: P - tepelný výkon
 R - rezistance vsázky z materiálu o rezistivitě ρ
 I_{ef}^2 - efektivní hodnota proudu protékajícího vsázkou

Podle vzniku a působení tepla se rozdělují odporová zařízení do dvou skupin, a to na zařízení s přímým a nepřímým odporovým ohřevem.

V této práci se budu zabývat pouze přímým odporovým ohřevem.

1.1 Přímý odporový ohřev

Přímý odporový ohřev je v zařízeních, kde vzniká teplo přímým průchodem proudu elektricky vodivou vsázkou nebo elektricky vodivou kapalinou = elektrolytem obklopující vsázku. [1]

Teorie přímého odporového ohřevu je jednoduchá = vychází z Joulova zákona, ale výpočty a projektování těchto zařízení nejsou snadná. Problémy jsou s nelineární závislostí fyzikálních vlastností vsázky či elektrolytu na teplotě. Jedná se o rezistivitu, o měrnou tepelnou kapacitu a o součinitel tepelné vodivosti. Tyto veličiny ovlivňují tepelnou bilanci ohřevu, kterou lze vyjádřit vztahem [1]:

$$Q = Q_u + Q_z$$

kde Q - je teplo vzniklé průchodem proudu
 Q_u - užitečné teplo potřebné k ohřevu vsázky
 Q_z - tepelné ztráty

Výše uvedená bilanční rovnice tvoří základ k určení potřebného výkonu [1].

$$P \approx \frac{dQ}{dt}$$

který závisí na časovém průběhu ohřevu vsázky. Celkový výkon P_c elektrotepelného zařízení se zvětšuje o tepelné ztráty, které jsou způsobené vsázcím zařízením, o výkon, který je potřebný pro pohony mechanismů, o ztráty transformátoru a o tepelné ztráty do okolí. [1]

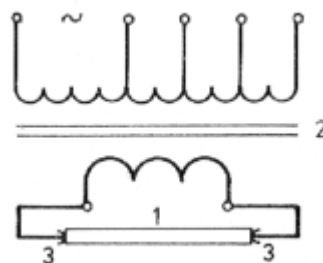
Na základě vzniku tepla lze zařízení pro přímý odporový ohřev rozdělit na dva základní typy[1]:

Prvním typem jsou zařízení pro ohřev pevné vsázky elektricky vodivé - kovové, uhlíkové nebo grafitové. Tato pevná vsázka je ve tvaru tyčí, drátů, pásů apod. [1]

Druhým typem jsou zařízení pro ohřev tekuté vsázky. Tekutou vsázkou v tomto případě představuje např. voda (ohřev vody v elektrodových kotlích) nebo roztavené sklo (elektrický přihřev a tavení skla) nebo může v tekuté vsázce probíhat elektrolyza (výroba hliníku termickou elektrolyzou). Další možnost ohřevu v tekuté vsázce je ohřev pevné kovové vsázky (solné lázně pro tepelné zpracování drobné vsázky nebo tzv. katodový ohřev kovové vsázky ve vodním roztoku soli). V praxi se uplatňují hlavně tyto typy. [1]

1.1.1 Ohřev dlouhých kovových tyčí, drátů pásů apod.

Princip tohoto ohřevu je naznačen na obr. 1. Jelikož je třeba aby byl ohřev po celé délce tyče rovnoměrný, musí být délka tyče nejméně 10krát větší než její průměr. Z regulačního transformátoru je pomocí kontaktů zaváděn potřebný proud do ohřívávané tyče. Ohřev je velmi rychlý a účinný. [1]



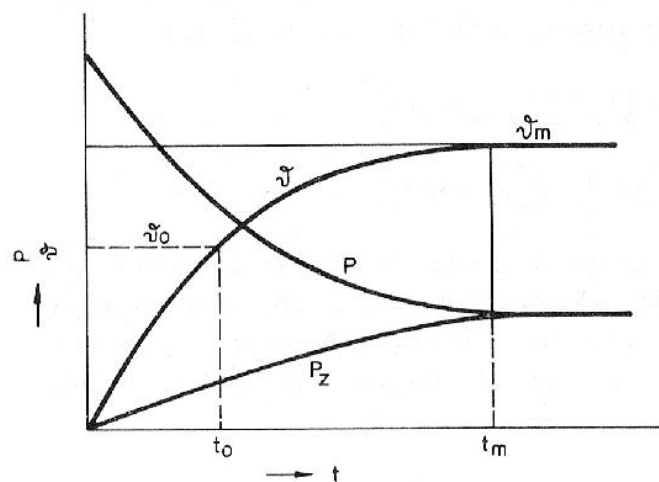
Obr.1.1: Přímý odporový ohřev tyčí

Optimální poměry pro ohřev jsou tehdy, jestliže činný odpor tyče se rovná impedanci celého přívodního vedení. Aby bylo přijatelné impedanční přizpůsobení, zvyšuje se během

ohřevu (u velkých výkonů) napětí na tyči souhlasně s růstem jejího odporu pomocí přepínání odboček na vstupním vinutí transformátoru. Účinnost při přímém ohřevu je překvapivě malá, protože při velkých proudech jsou velké reaktance na vedení ke kontaktům. Problémy nastávají s přivedením proudu kontakty do tyče, neboť kontakty musí být čisté. Kontakty jsou měděné, chlazené vodou a jsou pneumaticky nebo hydraulicky přitlačovány k tyči. Mezi nevýhody patří např. to, že ohříváný materiál je v době ohřevu vázán na kontakty, což ztěžuje mechanizaci. Dále při každé ohřívání tyči se musí vypínat a zapínat ohřev, což u velkých výkonů je problém. Tím rostou nároky na spínací zařízení a na velikost zkratového výkonu v síti, aby nedošlo ke kolísání napětí v síti. [1]

Jestliže chceme dosáhnout velké tepelné účinnosti ohřevu, měla by být doba ohřevu co nejkratší. Proto mají zařízení poměrně velký výkon, způsobují nerovnoměrné zatížení sítě. U zařízení nad 500 kW se používá tzv. symetrizační zařízení. Toto zařízení převádí jednofázovou zátěž na třífázovou. Ohřev přímým průchodem proudu je výhodné používat při výkonech do 100 kW. Pro větší výkony je vhodnější indukční ohřev. [1]

Na obrázku 1.2 je naznačen průběh příkonu, teploty a ztrát při přímém odporovém ohřevu ocelové tyče bez přepínání napětí. [1]



Obr. 1.2: Průběhy příkonu, teploty a ztrát při přímém odporovém ohřevu ocelové tyče

Příkon klesá v důsledku růstu odporu tyče s teplotou, tepelné ztráty rovněž rostou. Rovná-li se příkon ztrátám dosáhla teplota své mezní hodnoty. Proto teploty ohřevu musí být nižší než teplota mezní a je jí dosaženo v kratším čase než mezní teploty. Při přímém ohřevu ocelových feromagnetických tyčí se uplatňuje povrchový jev. Největší teplo (86,4%) vzniká

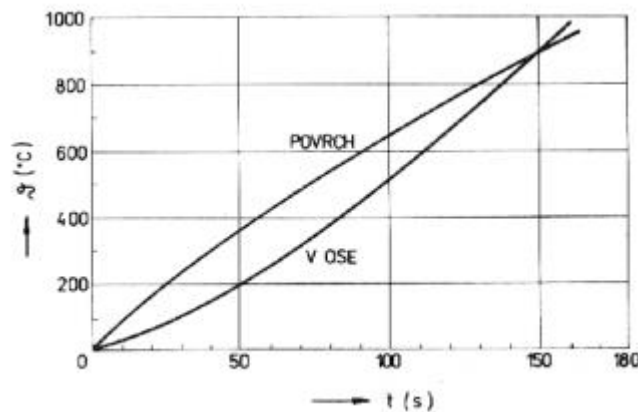
přibližně v tzv. hloubce vniku a . Lze určit podle následujícího vztahu [1]:

$$a = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0\mu_r}}$$

kde ρ rezistivita tyče,
 μ_r relativní permeabilita,
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$,
 $\omega = 2\pi f$.

Ztráta feromagnetismu nastává při tzv. Curieova bodu (u uhlíkaté oceli při 768°C) Do této ztráty je střední hloubka vniku pronikáním elektromagnetické vlnění při 50 Hz jednotky milimetrů. Při vyšší teplotě, relativní permeabilitě rovné 1 a rezistivitě sedmkrát větší je asi 70 mm. Proto se nejdříve ohřívá povrch tyči a nad 760 °C pak vnitřek, protože povrch vyzařuje tepelné ztráty sáláním. [1]

Časové průběhy teploty povrchu tyče a teploty v její ose (průměr 70 mm) jsou naznačeny na obr. 1.3. [1]



Obr. 1.3: Časové průběhy teplot při ohřevu ocelové tyče

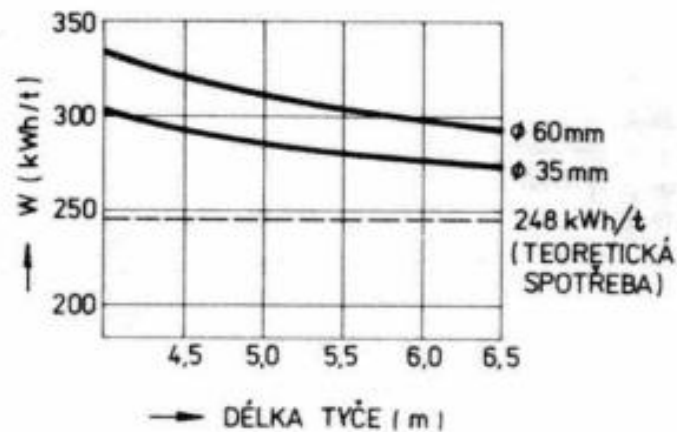
Ohřev ocelové tyče do 0,1 m, je-li rozdíl mezi teplotou povrchovou a teplotou v ose do 100°C. Pro nižší teploty, kdy lze zanedbat ztráty platí [1]:

$$mcd\mathcal{G} = Pdt \Rightarrow \frac{d\mathcal{G}}{dt} = \frac{P}{mc} \approx \frac{\Delta\mathcal{G}}{\Delta t}$$

kde P příkon do tyče, $P = \frac{U^2}{R} = R * I_{ef}^2$,
 m hmotnost tyče,
 c měrná tepelná kapacita.

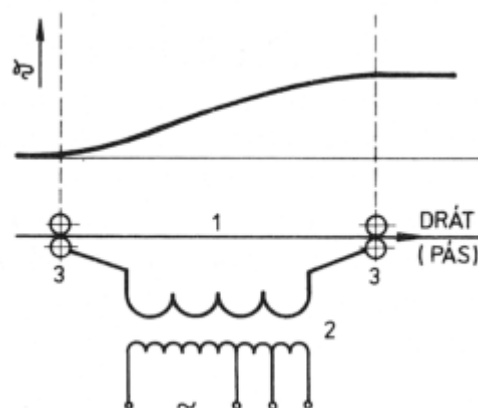
Podle výše uvedeného vztahu jsme schopni pro každé Δt určit $\Delta \vartheta$ a po krocích určit celkový průběh teploty. V každém kroku je možné určit změněný výkon - měrnou kapacitu závislou na teplotě. Do výpočtu je možné zavést tepelné ztráty, ale místo příkonu P dosadíme příkon zmenšený o ztráty. [1]

Na obrázku 1.4 je vidět průběh měrné spotřeby elektrické energie při přímém odporovém ohřevu v závislosti na průměru a délce tyče. [1]



Obr. 1.4: Měrné spotřeby elektrické energie

Zařízení pro ohřev drátu nebo pásu je znázorněno na obr. 1.5. Drát nebo pás je do proudového obvodu výstupní strany transformátoru připojen kladkami. [1]



Obr. 1.5 Schéma zařízení pro průběžný ohřev drátu (pásu) - 1 ohříváný drát (pás), 2 regulační transformátor, 3 kladky a příklady

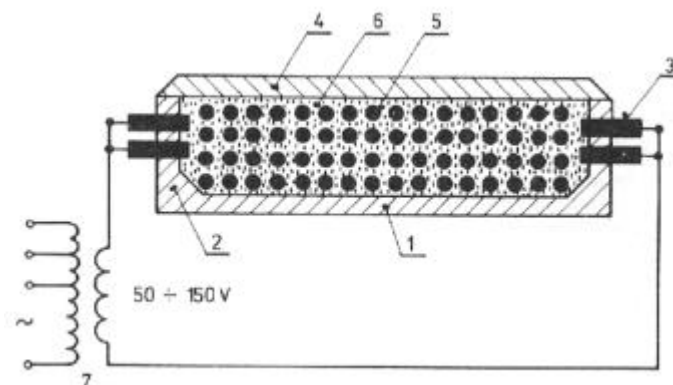
Změnou napětí mezi kladkami, změnou jejich vzájemné vzdálenosti, změnou protahovací rychlosti drátu lze dosáhnout požadované teploty ohřevu. [1]

Mezi výhody přímého odporového ohřevu patří rychlost ohřevu, nízká spotřeba elektrické energie a proto je malá oxidace i oduhlčení. Výše popsany ohřev se používá např. pro měkké žíhání měděných drátů a pásů před izolací pláštěm (protahovací rychlost až $1000 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$), pro ohřev ocelových tyčí pro kování, pro žíhání, pro ohýbání, kalení drátů do předpjatého betonu. [1]

1.1.2 Další možnosti použití přímého odporového ohřevu

1.1.2.1 Pece na výrobu grafitu a karbidu křemíku

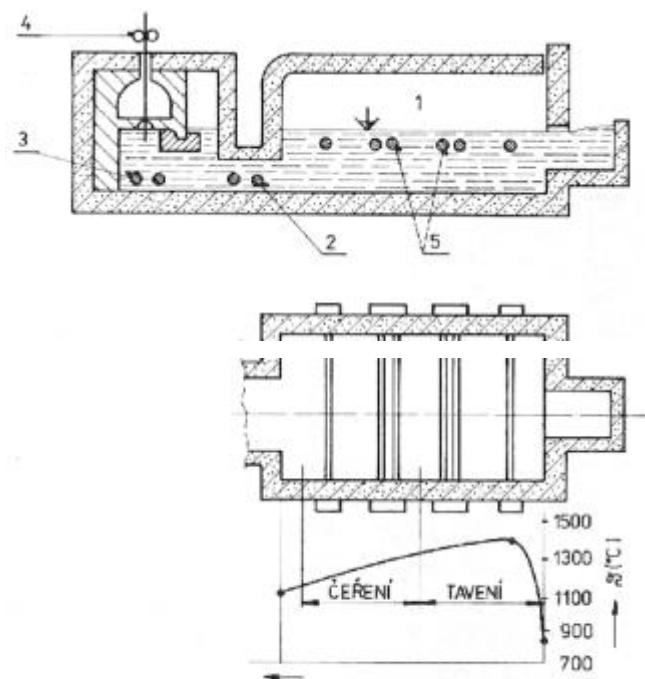
Grafit a karbid křemíku se vyrábějí v Achesonových pecích. Grafit se vyrábí z uhlíku tzv. grafitací - jedná se o chemický proces probíhající při teplotě $2500 \text{ }^\circ\text{C}$. Při tomto procesu se amorfni uhlík strukturálně mění v grafit. Pec na výrobu grafitu, tzv. grafitáční pec, je znázorněna na obr.1.6. Mezi pevné části pece patří dno pece 1, čelní stěny 2 s grafitovými bloky 3 pro přívod proudu z regulačního transformátoru. Vsázka 5 určená ke grafitaci je zasypaná ve směsi 6 z drceného grafitu, zrnitého koksu a černého uhlí. [1]



Obr. 1.6: Achesonova grafitáční pec - 1 dno pece, 2 čelní stěny, 3 grafitové bloky, 4 víko pece, 5 vsázka, 6 zasypaná směs, 7 regulační transformátor

1.1.2.2 Přímý odporový ohřev skla

Ve sklárnách se používají elektrodové pece - Tavení skla se provádí přímým průchodem proudu. Příklad elektrodové sklářské vany je na obr. 1.7 tavicí a pracovní vana na výrobu tabulového skla. V prostoru 1 s elektrodami 5 se taví sklo, je přiváděno do pracovního prostoru s elektrodami 2 a 3. Tyto elektrody způsobují ohřev skla na požadovanou teplotu a viskozitu, takže se může táhnout ve tvaru pásu směrem vzhůru zařízením 4. Elektrody jsou vhodně uspořádány a propojeny a připojeny na zdroj trojfázového proudu 50 Hz tak, aby zatěžovaly síť rovnoměrně. [1]

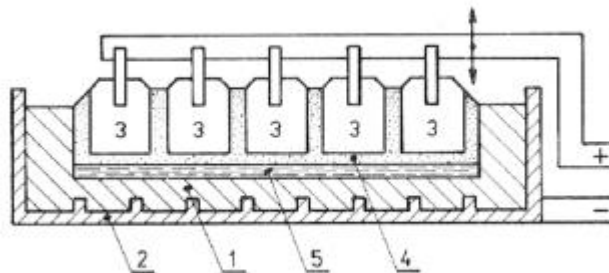


Obr. 1.7: Elektrodová sklářská vana - 1 prostor pro tavení skla, 2, 3 elektrody v pracovním prostoru, 4 tažné zařízení, 5 elektrody v tavicím prostoru

1.1.2.3 Termická elektrolyza

Princip termické elektrolyzy spočívá v tom, že se elektrolyt zahřívá přímým průchodem stejnosměrného proudu za současně probíhající elektrolyzy nebo rafinace. Nejrozšířenější termickou elektrolyzou je výroba hliníku. Na obr. 1.7 je znázorněn řez elektrolyzérem na výrobu hliníku. Elektrolyzér je tepelně izolovaná vana s vnitřním rozměrem 4 x 3 (m) a hloubkou 0,5 m. Katodu tvoří dno vany vyložené uhlíkovými bloky. Vana je v ocelovém plášti se žebry pro přívod proudu. Anodové elektrody jsou uhlíkové ploché bloky spojené s kladnou sběrníci, s níž se dají spouštět či zdvihát v elektrolytu. Při

elektrolýze se vylučuje hliník a v tekutém stavu se usazuje na katodě a tvoří vrstvu 5 na dně vany. [1]



Obr. 1.7: Elektrolyzátor na výrobu hliníku - 1 tuhý katodový blok vany, 2 ocelový plášť ze žebry, 3 elektrody, 4 elektrolyt, 5 tavený surový hliník

1.1.2.4 Ohřev kovů v elektrolytu - solné lázně

U tohoto ohřevu prochází proud elektrolytem - roztavenou solí, která je nositelem tepla. Kovová vsázka je ponořena do elektrolytu. Ohřev je obdobný jako ohřev roztaveného skla. Tato zařízení se nazývají solné lázně a používají se o ohřevu ocelových součástí ke kalení. [1]

Rozlišují se dva základní typy [1]:

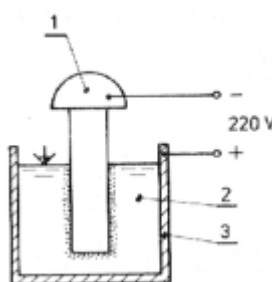
- Proud prochází jak elektrolytem, tak i vsázkou ponořenou v elektrolytu. Velice záleží na tvaru vsázky. Kdybychom měli vsázku, která by měla např. ostré okraje, tenké mezistěny, došlo by k jejím přehřátí, popř. k odtavení vlivem velké hustoty proudu. Příkon závisí na vsázce.
- U druhého typu se vsázka vkládá do soli v místě, kde není elektrické pole. Důsledek toho je, že vsázkou neprochází proud. Příkon nezávisí na vsázce.

Hlavní výhodou solných lázní je rychlý (velká hodnota součinitele přestupu tepla prouděním mezi elektrolytem a vsázkou), přesný a rovnoměrný ohřev vsázky bez přístupu vzduchu. Vhodným chemickým složením soli lze docílit také tepelného zpracování povrchu vsázky chemickou cestou. [1]

1.1.2.5 Katodový ohřev

Princip tohoto ohřevu je naznačen na obr. 1.9. Součást se ponoří do elektrolytu v kovové nádobě (např. voda s 10 % Na_2CO_3). Součástka představuje katodu, anodu zase nádoba. Během milisekund se na povrchu katody vytvoří vrstva páry, která odtlačuje elektrolyt od povrchu vsázky - dochází k elektrolýze. Stoupá přechodový odpor a vsázka se ohřívá vzniklým elektrickým obloukem. [1]

Tato metoda se používá pro ohřev nýtů, šroubů, hřídelů ke kalení nebo tváření. [1]



Obr. 1.9: Katodový ohřev - 1 ohříváná součást, 2 elektrolyt, 3 kovová nádoba

1.1.2.6 Elektroodový ohřev vody

Pro přípravu horké vody a výrobu páry se využívá tepla vzniklého přímým průchodem proudu ohřívanou vodou. Proud se přivádí elektrodami. Podle příkonu se volí typ elektrod. Pro malé příkony se volí grafitové elektrody a pro velké příkony kovové elektrody. Výkon se reguluje změnou vodivosti vody nebo vzdálenosti elektrod od sebe, jejich vzájemným přepojováním nebo plochou elektrod. [1]

Elektroodové kotle se konstruují nejen pro napětí 240 V a 400 V, ale také pro vysoká napětí až do 30 kV. Elektrody jsou deskové, tyčové, pevné i přestavitelné trubkové. U kotlů s výkonem nad 2 MW při napětí přes 6 kV je výkon regulován porcelánovými nebo křemennými trubkami, které se umísťují mezi elektrody pro změnu cesty proudu - mění se elektrický odpor, a tím i výkon elektroodového kotle. [1]

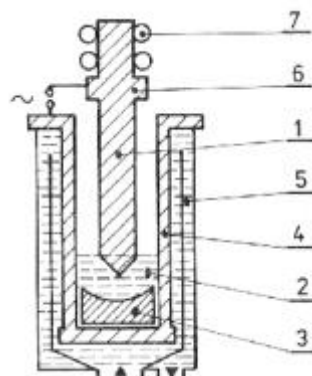
Pro největší výkony a napětí se používají elektroodové kotle trojfázové se zvláštní hlavou s tryskami, kterými proudí voda a uzavírá proudový obvod mezi hlavou a elektrodami a intenzivně se ohřívá. Pomocí změny počtu trysek se reguluje výkon. Průtokové kotle se vyrábějí od výkonu několika kilowattů až do několika megawattů. Voda se nejčastěji ohřívá nočním proudem a užívá se jako akumulární médium pro vytápění i technologie v průmyslu ,

zejména papírenském, textilním apod. K průmyslové výrobě se staví kotle s výkonem až 60 MW při provozním napětí 30 kV a přetlaku až 4 MPa. [1]

Pro vaření se nejčastěji používají elektrodové kotle na výrobní páry, která se rozvádí do varných kotlů a vrací se jako kondenzát. Regulátor výkonu v závislosti na tlaku páry ovládá krycí porcelánovou trubku na středové elektrodě a výkonový vypínač v přívodu 3 kV. [1]

1.1.2.7 Elektrostruskové přetavování oceli

Princip elektrostruskové pece je naznačen na obrázku 1.10. Elektrodu tvoří válcová, kovaná nebo lisovaná tyč z vybrané elektrooceli. Tato tyč zasahuje svým koncem do roztavené strusky. Ponořený konec se postupně odtavuje a průchodem struskou rafinuje, t.j. zbavuje se nekovových vměstků - zejména síry a částečně se i odplyňuje. Rafinovaná ocel pak následně tuhne v krystalizátoru, který je chlazený vodou. Z kvalitní oceli homogenní chemicky a strukturou vzniká ingot, který má výbornou tvárnost a dále se zpracovává. Proud z regulačního transformátoru se přivádí jedním pólem na elektrodu a druhým na krystalizátor. Elektroda se posouvá zařízením automaticky podle rychlosti odtavování a elektrických parametrů strusky. [1]

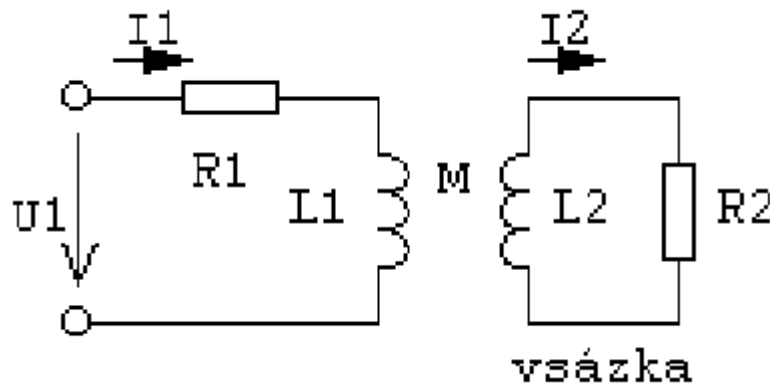


Obr. 1.12: Elektrostruskové přetavování oceli - 1 elektroda, 2 roztavená struska, 3 přetavený ingot, 4 krystalizátor, 5 chladící voda, 6 objímka elektrody, 7 zařízení k posuvu elektrody

2 Teoretické základy indukčního ohřevu

Použití indukčního ohřevu je možné pouze u materiálů, které jsou elektricky vodivé. Jestliže předmět neboli vsázku z vodivého materiálu vložíme do střídavého magnetického pole, indukují se v něm vířivé proudy, které předmět (vsázku) zahřívají. Teplo se dopravuje střídavým magnetickým polem a vzniká přímo vsázce na rozdíl od odporových zařízení, kde se teplo dopravuje tepelným spádem. Vsázka je nejteplejším místem celé soustavy - vše ostatní může být studené. Mezi největší výhodu indukčního ohřevu patří právě to, že teplo vzniká přímo v předmětu (ve vsázce), který není mechanicky s ničím vázán. [2]

Indukční ohřev si můžeme představit podle níže uvedeného obrázku 2.1 jako transformátor. Dvě cívky navzájem spřažené vzájemnou indukčností M . Primární cívka je napájena vysokofrekvenčním proudem a je tvořena vlastní indukčností L_1 a v sérii se svým ztrátovým činným odporem R_1 . Sekundární cívka představuje vsázku s indukčností L_2 , která je spojena nakrátko přes činný odpor R_2 . [9]



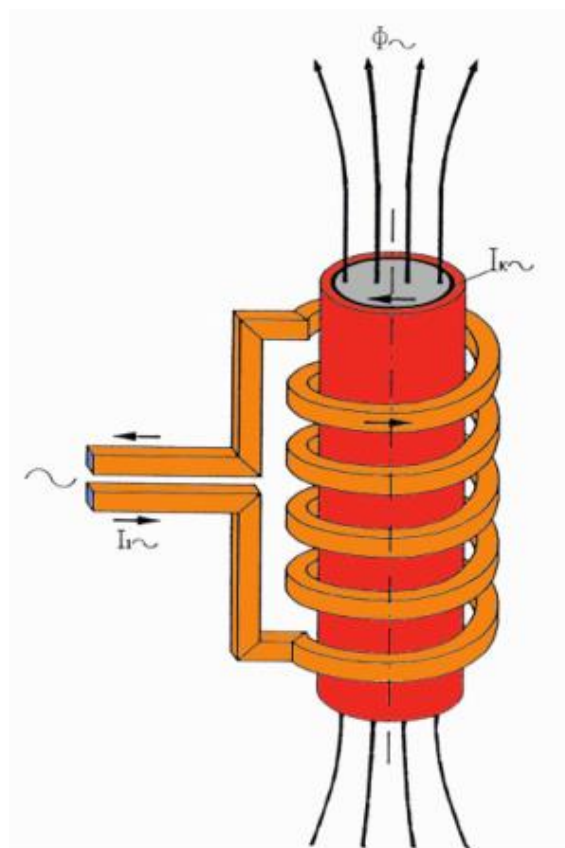
Obr. 2.1: Náhradní schéma indukčního ohřevu

Indukční ohřev umožňuje vysoké měrné příkony do vsázky. Jestliže zvolíme vhodnou frekvenci proudu, který napájí ohřívací vinutí a v jehož magnetickém poli je vsázka, jsme schopni ovlivnit rozdělení tepla ve vsázce. Pro vsázky, které mají velké rozměry se používá frekvence 50 Hz, pro malé využíváme vysoké frekvence - desítky až stovky kHz. [3]

2.1 Princip indukčního ohřevu

Podle fyzikálního indukčního zákona se kolem každého vodiče za průchodu střídavého proudu vytváří střídavé magnetické pole. Jestliže toto magnetické pole zesílíme, kovy které jsou umístěné v blízkosti se začnou zahřívát, protože se v nich vytvoří vířivé proudy (viz obr. 2.2). U indukčního ohřevu se využívá vlastností magnetického pole umět přenést energii bez přímého kontaktu. [3]

Problém u indukčního ohřevu je, že potřebujeme vytvořit dostatečné silné magnetické pole a umístit obrobek tak, aby byl optimální přenos silových čar z vodiče proudu k obrobku. Z tohoto důvodu je obrobek vložen doprostřed induktoru nebo cívky a všechny silové čáry se soustředí na obrobek. Silové čáry vynutí v obrobku proud, jehož intenzita je stejná jako proud induktoru. Aby se vytvořilo silné magnetické pole je zapotřebí značně velkých proudů, což by normálně vedlo k roztavení induktoru. Abychom tomuto předešli, jsou induktory vyrobeny z měděných trubek, které jsou chlazeny vodou. [3]



Obr. 2.2: Princip indukčního ohřevu

Další možnost jak vytvořit silné střídavé magnetické pole, spočívá ve zvyšování frekvence. V naší elektrické síti nebo v domácnostech je frekvence 50 Hz, ale u indukčního ohřevu pracujeme s frekvencí 50 až 1 000 000 Hz. Vysvětlení vysoké frekvence opět popisuje jeden fyzikálních zákonů, který se nazývá povrchový jev neboli skin efekt - elektrický proud protéká pouze v povrchové vrstvě obrobku, to znamená, že střed obrobku je teoreticky chladný. Tloušťka vrstvy, ve které proud protéká, je opět závislá na frekvenci. Pro nízké frekvence je vrstva silná, to znamená, že proud protéká obrobkem téměř až ke středu. Naopak u vysoké frekvence proud protéká pouze na povrchu. [3]

Zdroje energie pro indukční ohřev

Podle potřebné hloubky průchodu proudu je stanovena provozní frekvence indukčního zařízení. Oblast použitelné frekvence je od hodnoty 50 Hz až ke 3 MHz a člení se do tří dílčích oblastí [3] :

- Nízká frekvence: 50 Hz – 500 Hz,
- Střední frekvence: 500 Hz – 50 kHz,
- Vysoká frekvence: 50 kHz – 3 MHz.

2.2 Odvození rovnic pro šíření elektromagnetického vlnění

Pro popis indukčního ohřevu je nutné abychom odvodili rovnice pro šíření elektromagnetického vlnění, které vycházejí z Maxwellových rovnic [1] :

$$1. \operatorname{rot} \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$2. \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$3. \operatorname{div} \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} = \rho \quad (2.3)$$

$$4. \operatorname{div} \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = 0 \quad (2.4)$$

Provedeme rotaci 1. Maxwellovy rovnice:

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = \operatorname{rot} \gamma \mathbf{E} + \operatorname{rot} \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \gamma \operatorname{rot} \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\varepsilon(\operatorname{rot} \mathbf{E})}{\partial t} \quad (2.5)$$

Dále dosadíme za rot E z 2. Maxwellovy rovnice:

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = -\gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

Z vektorového počtu známe, že:

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot}\mathbf{H}) = \operatorname{grad}(\operatorname{div}\mathbf{H}) - \nabla^2\mathbf{H} \quad (2.7)$$

Z předchozích dvou rovnic (2.6) a (2.7) dostaneme:

$$\operatorname{grad}(\operatorname{div}\mathbf{H}) - \nabla^2\mathbf{H} = -\gamma\mu_0\mu_r \frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon_0\varepsilon_r\mu_0\mu_r \frac{\partial^2\mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

Ze 4. Maxwellovy rovnice (2.4) dosadíme za $\operatorname{div}\mathbf{H}=0$ a dostaneme rovnici pro magnetickou složku:

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

Nyní použijeme podobný způsob odvození pro získání rovnice pro elektrickou složku jako u předchozích rovnic a získáme:

$$\nabla^2\mathbf{E} = \gamma\mu_0\mu_r \frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t} + \varepsilon_0\varepsilon_r\mu_0\mu_r \frac{\partial^2\mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.10)$$

Rovnice (2.9) a (2.10) jsou obecné rovnice pro šíření elektromagnetického vlnění v prostředí, kde ε_r a μ_r jsou konstanty. Existuje ovšem prostředí vodivé, kde můžeme zanedbat ε_r a prostředí nevodivé, kde můžeme zanedbat γ , a tím zjednodušíme tyto rovnice. [1]

Pro nevodivé prostředí:

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

$$\nabla^2\mathbf{E} = \varepsilon_0\varepsilon_r\mu_0\mu_r \frac{\partial^2\mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.12)$$

Pro vodivé prostředí:

$$\nabla^2\mathbf{H} = \gamma\mu_0\mu_r \frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t} \quad (2.13)$$

$$\nabla^2\mathbf{E} = \gamma\mu_0\mu_r \frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.14)$$

Hlavní aplikační oblasti indukčního ohřevu jsou [3] :

- Tavení železných a neželezných kovů teplotami až k 1500°C,
- Ohřev pro kování na 1250°C,
- Žihání naměkko a normalizace teplotami 750 až 950°C po tváření za studena,
- Povrchové kalení obrobků z oceli a litiny při teplotách 850 až 930°C (popouštění 200 - 300°C) a měkké a tvrdé pájení za teplot až 1100°C, jakož i zvláštní oblasti, jako např. ohřev k lepení, spékání.

Indukční ohřev nabízí zdroj tepla, který je velmi regulovatelný. Toto nabízí možnost vysokého stupně automatizace a dá se vestavět podobně jako obráběcí stroje, do výrobní linky. Indukční ohřev je dnes dílčí oblast elektrického tepla používaného v rozmanitější podobě v průmyslu a v domácnosti. Hlavní oblast použití spočívá v ocelářském a kovo zpracujícím průmyslu. [3]

3 Výpočet potřebné energie pro přímý odporový ohřev

V dále uvedeném případě je naznačen návrh výpočtu, který využívá přímého odporového ohřevu k ohřevu na teplotu tváření hliníku 462 °C. Toto elektrotepelné zařízení se stává z více bloků, které tvoří celou výrobní linku. Nejprve se drát, který je odvíjen ze svitku narovná pomocí narovnávacích kladek a poté je posouván mezi kontaktní kladky, kterými je do něj přímým průchodem zaváděn proud. Tuto výrobní linku máme schématicky naznačenou na obrázku 1.5.

3.1 Návrh analytického výpočtu

Nejprve budu vycházet z výpočtu energetické bilance:

$$E = m * c_p * (T_k - T_0) \quad (3.2)$$

Tento vztah upravím:

$$R * I_{ef}^2 * t = m * c_p * (T_k - T_0) \quad (3.3)$$

kde	R	odpor materiálu	I_{ef}	efektivní hodnota proudu
	t	doba ohřevu	m	hmotnost ohřívaného materiálu
	c_p	měrná tepelná kapacita	T_k	konečná teplota
			T_0	počáteční teplota

Pomocí této metody jsme schopni získat představu o množství potřebné energii pro tepelné zpracování. Dále můžeme z rovnice (3.3) získat výkon, na který se musí dimenzovat transformátor.

Dále je potřeba při řešení tohoto problému zahrnout další skutečnosti:

- Odpor se v závislosti na teplotě bude zvyšovat,
- měrná tepelná kapacita se bude rovněž zvyšovat v závislosti na teplotě.

Odpor materiálu

Odpor materiálu se bude se zvyšující teplotou také zvyšovat. Jedním způsobem jak určit jeho střední hodnotu je, že vezmu jeho odpor při 20°C a při 462°C a udělám z těchto hodnot aritmetický průměr. Tato metoda je ovšem velmi nepřesná, protože rezistivita v závislosti na teplotě není lineární. Další a přesnější metodou je, že z hodnot, které mám uvedené v příloze 1 určím střední hodnotu a to je $1,84 \cdot 10^{-8} [\Omega \cdot m]$. Tyto hodnoty jsou vygenerované přímo pro hliník v závislosti na teplotě od 20°C do 462°C.

Měrná tepelná kapacita

Měrná kapacita se bude rovněž zvyšovat se zvyšující se teplotou. Při zvolení této hodnoty budu postupovat obdobným způsobem jako u určení hodnoty odporu. Střední hodnota měrné tepelné kapacity je $c_p = 822 [J \cdot kg^{-1} K^{-1}]$. Opět mám vygenerované hodnoty měrné tepelné kapacity pro hliník, které jsou uvedeny v příloze 2.

Efektivní hodnota proudu

Tuto hodnotu získám úpravou rovnice (3.3).

Doba ohřevu

Tuto hodnotu si zvolím. Počáteční čas bude 100 s a postupně budu snižovat až na 20 s a bude vidět, jak se mění proud a tím i dodávaný výkon.

Hmotnost materiálu

Hmotnost materiálu určím ze strojnických tabulek. Pro hliníkovou tyč o délce 1 m a průměru 10 mm je hmotnost $m = 0,212 \text{ kg}$.

Počáteční teplotu

Počáteční hodnotu T_0 si zvolím 20°C.

Konečná teplota

Jelikož se jedná o návrh přímého odporového ohřevu za účelem tváření za tepla, které probíhá nad rekrystalizační teplotou a to nad hodnotou 70 % teploty tání daného materiálu. V našem případě se jedná o hliník, který má teplotu tání 660 °C. Konečná teplota bude tedy 462°C.

3.2 Analytický výpočet

Materiál	m [kg]	$c_{stř} [J.kg^{-1}.K^{-1}]$	$\rho_{stř} [\Omega.m]$	$T_0 [^{\circ}C]$	$T_k [^{\circ}C]$	l [m]	d [mm]
AL	0,212	822	$1,84.10^{-8}$	20	462	1	10

Pro výpočet potřebné elektrické energie přímého odporového ohřevu vycházíme z rovnice (3.2):

$$E = m * c_p * (T_k - T_0)$$

$$E = 0,212 * 822 * (462 - 20) = 77024,688 \text{ [J]}$$

V dalším kroku použijí rovnici (3.2):

$$R * I_{ef}^2 * t = m * c_p * (T_k - T_0)$$

$$R = \frac{\rho * l}{S} = \frac{\rho * l}{\frac{\pi * d^2}{4}} = \frac{1,84.10^{-8} * 1}{\frac{\pi * 0,01^2}{4}} = 2,3427.10^{-4} \text{ [\Omega]}$$

$$R * I_{ef}^2 * t = 77024,688 \Rightarrow I_{ef} = \sqrt{\frac{77024,688}{R * t}}$$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{77024,688}{R * t}} = \sqrt{\frac{77024,688}{2,3427.10^{-4} * 100}} = 1813,25 \text{ [A]}$$

$$P = R * I_{ef}^2$$

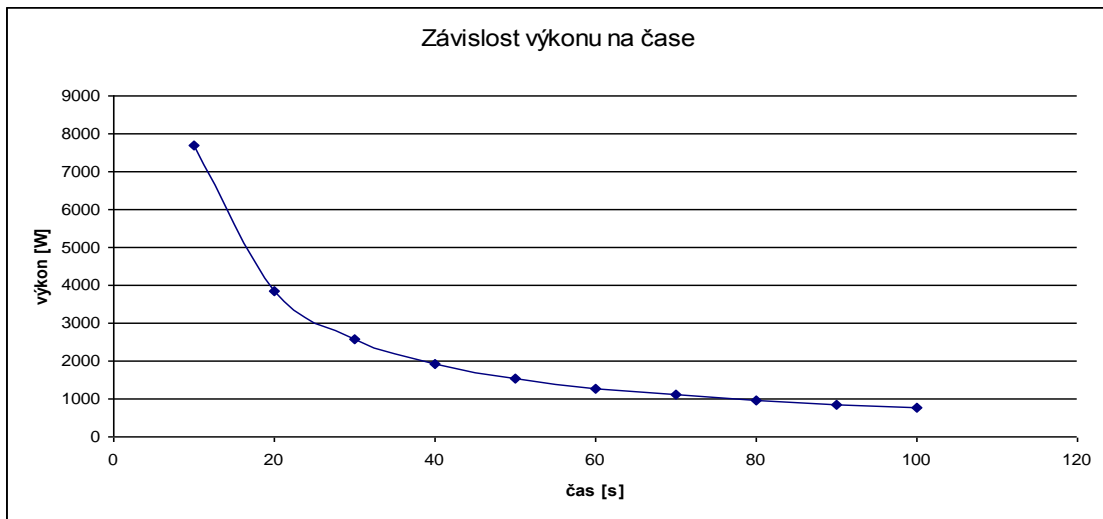
$$P = 2,3427.10^{-4} * 1813,25^2 = 770,25 \text{ [W]}$$

Pro přehlednost přikládám tabulku a graf, kde bude řešen přímý odporový ohřev dané hliníkové tyče pro čas od 100 s do 10 s.

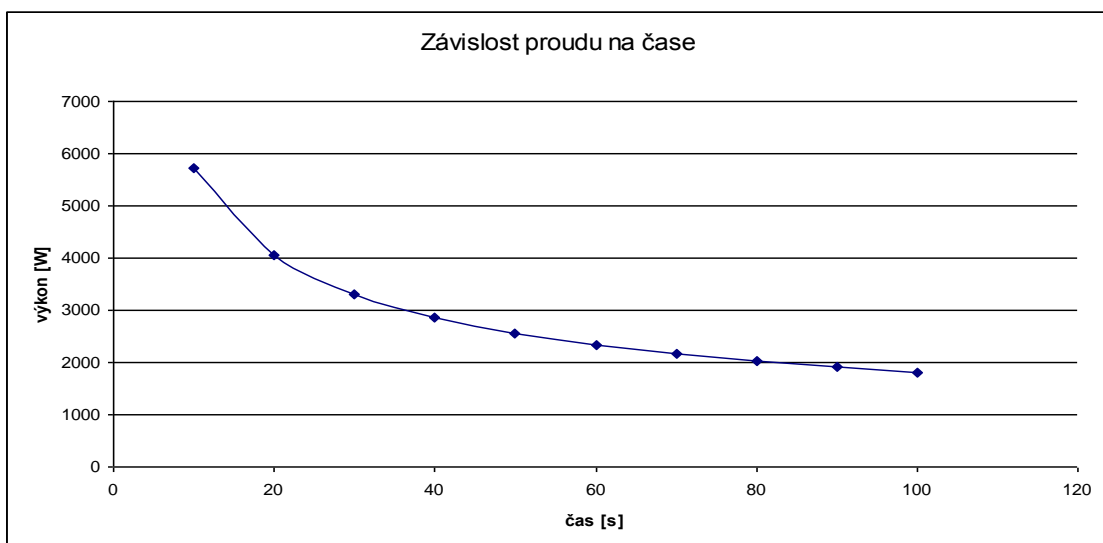
Tab.3.2 - Závislost proudu a výkonu na čase

Čas [s]	Proud [A]	Výkon [W]
100	1813,25	770,25
90	1911,33	855,83
80	2027,27	962,8
70	2167,24	1100,35
60	2340,89	1283,74
50	2564,32	1540,5
40	2866,99	1925,61
30	3310,52	2567,5
20	4054,54	3851,23
10	5733,99	7702,48

Graf 3.2

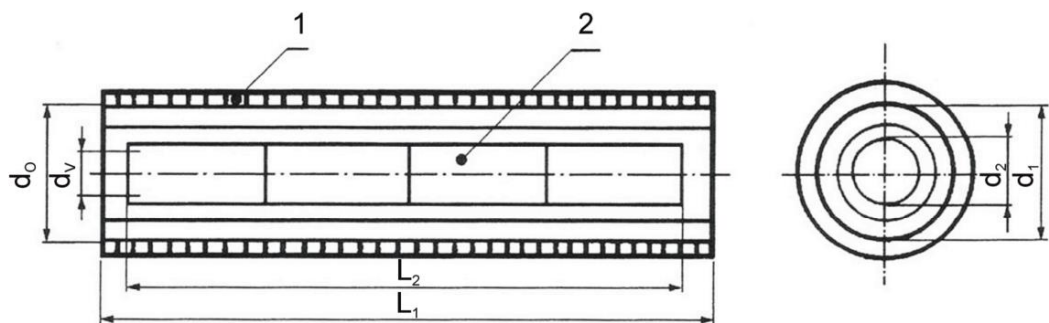


Graf 3.3



4 Výpočet potřebné energie pro indukční ohřev

Pro tento výpočet využijí tzv. indukční ohřivačku. Toto zařízení má využití v závodech, kde se zhotovují součásti kováním nebo lisováním za horka a je důležité rovnoměrné prohřátí materiálu. Kovové vývalky válcového nebo čtyřhranného profilu, nejčastěji ocelové, je třeba ohřát na kovací teplotu. Prohřívání v indukční ohřivačce je osově symetrické a protože teplo vzniká přímo v materiálu, trvá prohřívání velmi krátkou dobu, takže prakticky nenastává oxidace na povrchu. Indukční prohřívání je výhodné při výrobě vývalků ve velkých sériích, jako např. v automobilkách, v závodech na kuličková ložiska a pod. [2]



Obr. 4.1: Schéma indukčního prohřívacího zařízení

Hlavní částí indukční ohřivačky je cívka 1 o délce asi 1 m. Její průměr se volí podle průměru vývalku, které mají být prohřívány. V induktoru je obvykle větší počet vývalků stejné délky. Indukční ohřivačky se dodávají i s několika induktory pro různé průměry vývalků. Výměna induktoru pro jiný průměr vývalku trvá asi 1 hodinu. [2]

Na obrázku 4.1 vidíme zásobník 2, do kterého se vloží i několik vývalků. [2]

K výpočtu je potřeba si zvolit kmitočet v závislosti na průměru vývalku, dobu prohřívání a zvolit vhodný typ napájecího zdroje o vhodném výkonu, kmitočtu a napětí. Následně pak musíme určit elektrickou a tepelnou účinnost. [2]

4.1 Výpočet indukčního ohřevu pomocí indukční ohříváčky [2]

Provedu elektrický výpočet indukčního ohřevu k prohřívání hliníkových tyčí o průměru 10 mm a délce 1 m na teplotu tváření 462 °C. Střední hodnota měrného odporu je $4,54 \cdot 10^{-6}$ [$\Omega \cdot m$]. Pro tento výpočet jsem dále určil elektrickou a tepelnou účinnost: $\eta_{el} = 0,75$ a $\eta_{tep} = 0,84$.

Volba napájecího zdroje

Vycházím z toho, že musím určit frekvenci v závislosti na průměru vývalku. Využiji k tomu tento vztah:

$$d_2 = 6 * a_2$$

kde d_2 průměr vývalku (vsázky)

$$a_2 = \sqrt{\frac{2}{\omega \gamma \mu_0 \mu_r}} \quad \text{hloubka vniku}$$

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$d_2 = 6 * \sqrt{\frac{2}{\omega \gamma \mu_0 \mu_r}}$$

$$0,01 = 6 * \sqrt{\frac{2}{\omega \gamma \mu_0 \mu_r}}$$

$$0,01^2 = 36 * \frac{2}{2\pi f \gamma \mu_0 \mu_r}$$

$$2\pi f \gamma \mu_0 \mu_r * 0,01^2 = 36$$

$$f = \frac{72}{2\pi \gamma \mu_0 \mu_r * 0,01^2} = \frac{72}{2\pi * 54347826,09 * 4\pi \cdot 10^{-7} * 1 * 0,01^2} = 1679 \text{ Hz}$$

Kmitočet napájecího zdroje v závislosti na průměru vývalku vyšel 1679 Hz. Výkon zdroje jsem zvolil 10 kW a napětí 500 V.

Měrná spotřeba středofrekvenční energie na zahřátí 1 kg hliníku na 462 °C bude:

$$W = \frac{0,098}{0,75 * 0,84} = 0,155 \text{ kWh.kg}^{-1}$$

Výkonem 10 kW lze prohřát za 1 hodinu množství G

$$G = \frac{10}{0,155} = 64,28 \text{ kg}$$

Hliníková tyč o délce 1 m a hmotnosti 0,212 kg se uvedeným výkonem prohřeje za:

$$t = \frac{3600}{\frac{64,28}{0,212}} = 11,8 \text{ sec}$$

Jelikož je znám průměr d_2 a délka vsázky l_2 , určím vnitřní průměr d_1 a délku l_1 cívky. Průměr cívky d_1 nemá být o mnoho větší než průměr d_2 vsázky, protože se tím zhoršuje elektrická vazba obvodů a tím i elektrická účinnost přenosu energie s cívky do vsázky. Proto se mezi vsázku a cívku vkládá keramická izolační vrstva o tloušťce t_i asi 1 - 2 cm, pro průměry d_2 v rozmezí 2 - 12 cm. Vývalky procházejí válcovou vyzdívkou s vůlí $t_v = 0,5 - 1$ cm. Vnitřní průměr tedy bude [2]:

$$d_1 = d_2 + 2t_i + 2t_v = 0,01 + 2 * 0,015 + 2 * 0,0075 = 0,055 \text{ m}$$

Délka cívky l_1 se volí podle vztahu:

$$l_1 = l_2 + 2,5 * \frac{d_1 - d_2}{2} = 1 + 2,5 * \frac{0,055 - 0,01}{2} = 1,0563 \text{ m}$$

Nyní určím průměr cívky z měděné trubky, její vlastní indukčnost a odpor. Měrný odpor mědi o teplotě +50 °C je $2 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$

$$\rho_1 = 2 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$$

$$a_1 = 5,033 \cdot 10^2 * \sqrt{\frac{\rho_1}{f * \mu}} = 5,033 \cdot 10^2 * \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-8}}{1679 * 4\pi \cdot 10^{-7}}} = 1,55 \text{ mm} = 0,155 \text{ cm}$$

$$d_c = d_1 + a_1 = 5,5 + 0,155 = 5,655 \text{ cm} = 0,0565 \text{ m}$$

Z tabulky 3 v příloze 3 vyhledám součinitele α_1 :

$$\alpha_1 = f\left(\frac{0,0565}{1,0563}\right) = f(0,053) = 0,979104$$

Indukčnost L_1 :

$$L_1 = \mu_0 \pi * \left(\frac{d_c}{2}\right)^2 * \frac{\alpha_1}{l_1} * N_1^2 = 4\pi \cdot 10^{-7} \pi * \left(\frac{0,0565}{2}\right)^2 * \frac{0,979}{1,0563} * N_1^2 = 2,768 \cdot 10^{-9} * N_1^2 \quad [\text{H}]$$

$$R_1 = \rho_1 * \frac{\pi * d_c * N_1^2}{a_1 * \left(l_1 - \frac{U_g}{15000}\right)} = 2 \cdot 10^{-8} * \frac{\pi * 0,0565 * N_1^2}{1,55 * \left(1,0563 - \frac{500}{15000}\right)} = 6,139 \cdot 10^{-8} * N_1^2 \quad [\Omega]$$

Dále určím náhradní průměr vsázky, její vlastní indukčnost a vlastní odpor:

Hloubka vniku do vsázky:

$$a_2 = 5,033 \cdot 10^2 * \sqrt{\left(\frac{\rho_2}{f * \mu}\right)} = 503,3 * \sqrt{\left(\frac{4,54 \cdot 10^{-6}}{1679 * 4\pi \cdot 10^{-7}}\right)} = 1,49 \text{ mm}$$

Argument x_2 :

$$x_2 = \frac{r_2 * \sqrt{2}}{a_2} = \frac{0,5 * 1,41}{1,49} = 0,473$$

Z tabulky 4 v příloze 4 odečtu hodnoty $P(x)$ a $Q(x)$ pro argument $x_2 = 0,42$

$$P(x) = 0,004 \quad Q(x) = 0,19989$$

Nyní vypočtu hodnotu funkce $Y(x)$:

$$Y(x_2) = \sqrt{1 + \left(\frac{2P(x_2)}{x_2 - Q(x_2)} \right)^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{2 * 0,004}{0,473 - 2 * 0,19989} \right)^2} = 1,005$$

Poloměr náhradního válce:

$$r_n = r_2 * \sqrt{1 - \frac{2}{x_2} Q(x_2)} * Y(x_2) = 0,005 * \sqrt{1 - \frac{2}{0,473} * 0,19989} * 1,076 = 0,002 \text{ m}$$

Určím funkci α_2 pro náhradní vsázku:

$$\alpha_2 = f\left(\frac{0,004}{1}\right) = f(0,004) = 1$$

Nyní vypočtu indukčnost náhradní cívky:

$$L_n = \mu_0 * \pi * (r_2)^2 * \frac{\alpha_2}{l_2} = 4\pi \cdot 10^{-7} * \pi * (0,005)^2 * \frac{1}{1} = 9,86 \cdot 10^{-11} \quad [\text{H}]$$

$$\omega L_n = 2 * \pi * f * L_n = 2 * \pi * 1679 * 9,86 \cdot 10^{-11} = 1,04 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Odpor náhradní vsázky určím podle vztahu:

$$\begin{aligned} R_n &= \frac{R_{n1}}{l_2} = \rho_2 * 2 * \pi * x_2 * P(x_2) * \frac{Y^2(x_2)}{l_2} = 4,54 \cdot 10^{-6} * 2 * \pi * 0,473 * 0,004 * \frac{1,005^2}{1} = \\ &= 7,013 \cdot 10^{-8} \Omega \end{aligned}$$

Jakost obvodu náhradního válce:

$$Q_n = \frac{\omega L_n}{R_n} = \frac{1,04 \cdot 10^{-5}}{7,013 \cdot 10^{-8}} = 14,83$$

Dále vypočtu převodní poměr p:

$$p = \frac{F}{Y(x_2) * \alpha_2} * N_1$$

$$F = \sqrt{\frac{\alpha_1 * \alpha_2 * l_2}{l_1}} = \sqrt{\frac{0,979104 * 1 * 1}{1,0563}} = 0,96276$$

Ve výpočtech budu potřebovat p^2 , takže vzorec upravím:

$$p^2 = \frac{F^2}{Y(x_2)^2 * \alpha_2^2} * N_1^2 = \frac{0,96276^2}{1,005^2 * 1^2} * N_1^2 = 0,9160 * N_1^2$$

Výsledná reaktance bude:

$$\begin{aligned} \omega L_l &= \omega L_1 - \omega * p^2 * L_n = 2 * \pi * 1679 * N_1^2 * (2,768 \cdot 10^{-9} - 0,9160 * 9,86 \cdot 10^{-11}) = \\ &= 2,824 \cdot 10^{-5} * N_1^2 \end{aligned}$$

Předchozí rovnici můžeme přepsat do tvaru:

$$\omega L_l = k_1 * N_1^2 = 2,824 \cdot 10^{-5} * N_1^2$$

Nyní vypočtu výsledný ohmický odpor:

$$R_l = R_1 + p^2 * R_n = 6,139 \cdot 10^{-8} * N_1^2 + 0,9160 * N_1^2 * 7,013 \cdot 10^{-8} = 1,256 \cdot 10^{-7} * N_1^2$$

Předchozí rovnici opět můžeme přepsat do tvaru:

$$R_l = k_2 * N_1^2 = 1,256 \cdot 10^{-7} * N_1^2$$

Potřebný počet závitů cívky N_1 je :

Nejdříve je potřeba do celkového příkonu započíst ztráty v kondenzátorové baterii a vedení. Tyto ztráty jsem odhadl na 10 %. Výkon P_C pak bude:

$$P_C = \frac{P}{1-0,1} = \frac{10000}{0,9} = 11111,1 \text{ W}$$

Počet závitů cívky N_1 :

$$N_1^2 = \frac{k_2}{k_1^2 + k_2^2} * \frac{U_g^2}{P_c} = \frac{1,256 \cdot 10^{-7}}{(2,824 \cdot 10^{-5})^2 + (1,256 \cdot 10^{-7})^2} * \frac{500^2}{11111,1} = 3545,3509$$

$$N_1 = \sqrt{3545,3509} = 59,54 \cong 60$$

Výsledná indukčnost, výsledný odpor a převodní poměr bude:

$$L_l = \frac{2,824 \cdot 10^{-5}}{\omega} * N_1^2 = \frac{2,824 \cdot 10^{-5}}{2 * \pi * 1679} * 60^2 = 9,494 \cdot 10^{-6} \text{ H}$$

$$R_l = 1,256 \cdot 10^{-7} * N_1^2 = 1,256 \cdot 10^{-7} * 60^2 = 4,454 \cdot 10^{-4}$$

$$p^2 = 0,9160 * 60^2 = 3247,65$$

Proud I_1 :

$$I_1 = \frac{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}}{k_2} * \frac{P_C}{U_g} = \frac{\sqrt{(2,824 \cdot 10^{-5})^2 + (1,256 \cdot 10^{-7})^2}}{1,256 \cdot 10^{-7}} * \frac{11111,1}{500} = 4994,64 \text{ A}$$

Elektrická účinnost bude:

$$\eta_{el} = \frac{p^2 * R_n}{R_l} = \frac{3247,65 * 7,013 \cdot 10^{-8}}{4,454 \cdot 10^{-4}} = 0,51 = 51 \%$$

Kapacita kondenzátorové baterie:

$$C = \frac{L_I}{R_I^2 + (\omega L_I)^2} = \frac{9,494 \cdot 10^{-6}}{(4,454 \cdot 10^{-4})^2 + (2,824 \cdot 10^{-5} * 60^2)^2} = 9,48 \cdot 10^{-5} \text{ F}$$

Potřebný výkon kondenzátorové baterie Q_C :

$$Q_C = \omega * C * U_g^2 = 2 * \pi * 1679 * 9,48 \cdot 10^{-5} * 500^2 = 250 \text{ kVAr}$$

Jakost obvodu:

$$Q_I = \frac{\omega * L_I}{R_I} = \frac{2 * \pi * 1679 * 9,494 \cdot 10^{-6}}{4,454 \cdot 10^{-4}} = 224,76$$

Proud tekoucí kondenzátorovou baterií:

$$I_C = I_1 * \frac{Q_I}{\sqrt{(1 + Q_I^2)}} = 4994,64 * \frac{224,76}{\sqrt{(1 + 224,76^2)}} = 4994,593 \text{ A}$$

Při výpočtu závitů N_1 jsem stanovil hodnotu celkového příkonu $P_C = 11111,1 \text{ W}$.

4.2 Úvaha o průřezu vodiče

$$l_1 = 1056,3$$

Výška jednoho závitu:

$$v_z = \frac{1056,3}{60} = 17,6 \text{ mm}$$

Mezera mezi závity je 1 mm. Skutečnou výšku závitu volím 16 mm. Proud $I_1 = 4994,6 \text{ A}$.

Tloušťka aktivní části vodiče - optimální:

$$t = \frac{\pi}{2} * d_{cu} = \frac{\pi}{2} * 1,55 = 2,43 \text{ mm}$$

$$A = 16 * 2,43 = 38,88 \text{ mm}^2$$

$$J = \frac{4994,6}{38,88} = 128,46 \text{ [A.mm}^{-2}\text{]}$$

Proudová hustota J vyšla příliš velká a vznikal by problém s chlazením. Proto musím zvýšit průřez na 108 mm^2 .

$$J = \frac{4994,6}{108} = 46,2 \text{ [A.mm}^{-2}\text{]}$$

Tato hodnota proudové hustoty je již přípustná.

Závěr

Cílem této práce bylo porovnat výhody a nevýhody přímého odporového a indukčního ohřevu. Tyto ohřevy byly aplikovány na hliníkové tyče o průměru 10 mm a délce 1 m za účelem tváření za tepla. Ve výpočtech byly odhadnuty některé konstanty, které jsou v praxi běžně používané a jsou pro každý model jiné. To mělo za následek mírné zkreslení výsledků tohoto teoretického modelu. Pro přesnější výpočty by bylo dobré použít konkrétní model z praxe.

Pro přímý odporový ohřev hliníkové tyče na teplotu tváření za tepla 462 °C je třeba výkon 6,5 kW.

Pro indukční ohřev hliníkové tyče na teplotu tváření za tepla 462 °C je třeba výkon 11,1 kW.

Z hlediska potřebné energie je výhodnější přímý odporový ohřev, který má skoro o polovinu nižší potřebný výkon než indukční ohřev. Je to z toho důvodu, že u přímého odporového ohřevu prochází proud přímo ohříváním materiálem (vsázkou), kdežto u indukčního ohřevu se materiál vloží do střídavého magnetického pole, které indukuje vířivé proudy ve vsázce, které ji zahřívají. Dále mají velký vliv na účinnost ztráty v induktoru.

U indukčního ohřevu je největší nevýhodou cena, která je velice závislá na volbě napájecího zdroje, konkrétně na frekvenci a výkonu zdroje.

Přímý odporový ohřev se nejvýhodněji používá pro výkony do 100 kW. U výkonů nad 500 kW se musí provádět tzv. symetrizace, což také značně zvyšuje náklady.

Obě výše popsané metody jsou v praxi běžně používané. Vždy záleží na rozhodnutí o výběru typu varianty, pro jaký typ výrobku nebo výroby je použit. Současně i vzhledem k rozdílné finanční náročnosti použité varianty je důležité rozhodnutí investora nebo výrobce, kterou variantu si vybere s ohledem na technické parametry výrobku.

Domnívám se ale, že pro teoretický model, rozebíraný v mé diplomové práci, je výhodnější použít přímý odporový ohřev.

Literatura

- [1] RADA, J.a kolektiv. *Elektrotepelná technika*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury,ALFA, 1985.
- [2] Prof. Ing. Dr. Emil LANGER, DRSC. a Doc. Ing. Jiří KOŽENÝ, CSC. *Elektrotepelná zařízení indukční: Základy teorie, výpočty a konstrukce*. Plzeň: VŠSE v Plzni - ediční středisko, 1982. I.
- [3] INDUCTOHEAT EUROPE. *Co je indukční ohřev ?*. 16 s.
- [4] LEINVEBER, Jaroslav ŘASA a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: Upravené a doplněné vydání*. Třetí, doplněné vydání. Praha: Scienta, spol. s.r.o. pedagogické nakladatelství, 1999. ISBN 80-7183-164-6.
- [5] FAKULTA VÝROBNÍCH TECHNOLOGIÍ A MANAGEMENTU UNIVERZITY J. E. PURKYNĚ V ÚSTÍ NAD LABEM. *Tváření: Učební text určený pro bakalářskou formu studia*. 119 s.
- [6] Vlastnosti hliníku - <http://cs.wikipedia.org/wiki/Hliník>
- [7] *Material Properties Database* [<http://www.matdat.com/Default.aspx>]. [cit. 2014-05-05].
- [8] HRADÍLEJK, Zdeněk, Josef GAVLAS, Vladimír KRÁL, Czeslaw SAJDAK, Alicja KUREK, Romam PRZYLUCKI a Jacek CHRAPONSKI. *Elektrotepelná technika: Simulace - počítačové programy*. Ostrava: VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2001. ISBN 80-7078-874-7.
- [9] *Puma: power user mathematic array* [http://panther.feld.cvut.cz/cs/wiki/indukcni_ohrev]. [cit. 2014-05-05].

Seznam příloh

Tabulka č. 01	Hodnoty použité rezistivity
Tabulka č. 02	Hodnoty použité měrné tepelné kapacity
Tabulka č. 03	Určení hodnoty součinitele α
Tabulka č. 04	Určení hodnot $P(x)$ a $Q(x)$

Přílohy

Příloha 1

Tabulka 1. Rezistivita hliníku v závislosti na teplotě (převzato z [7])

Rezistivita	Teplota
8.6732e-012	21.0
5.3443e-011	31.0
2.0209e-010	41.0
5.2241e-010	51.0
1.0924e-009	61.0
1.7893e-009	71.0
2.5989e-009	81.0
3.5074e-009	91.0
4.5006e-009	101.0
5.5645e-009	111.0
6.6852e-009	121.0
7.8485e-009	131.0
9.0405e-009	141.0
1.0247e-008	151.0
1.1454e-008	161.0
1.2648e-008	171.0
1.3814e-008	181.0
1.4939e-008	191.0
1.6026e-008	201.0
1.7224e-008	211.0
1.8414e-008	221.0
1.9597e-008	231.0
2.0772e-008	241.0
2.1940e-008	251.0
2.3102e-008	261.0
2.4258e-008	271.0
2.5408e-008	281.0
2.6553e-008	291.0
2.7693e-008	301.0
2.8829e-008	311.0
2.9961e-008	321.0
3.1089e-008	331.0
3.2214e-008	341.0
3.3336e-008	351.0

3.4456e-008	361.0
3.5573e-008	371.0
3.6689e-008	381.0
3.7804e-008	391.0
3.8918e-008	401.0
4.0031e-008	411.0
4.1144e-008	421.0
4.2258e-008	431.0
4.3372e-008	441.0
4.4488e-008	451.0
4.5605e-008	461.0

Příloha 2

Tabulka 2. Měrná tepelná kapacita v závislosti na teplotě (převzato z [7])

Měrná kapacita	Teplota
4.8166e+002	100.0
5.2824e+002	110.0
5.7060e+002	120.0
6.0903e+002	130.0
6.4382e+002	140.0
6.7525e+002	150.0
7.0358e+002	160.0
7.2907e+002	170.0
7.5198e+002	180.0
7.7251e+002	190.0
7.9091e+002	200.0
8.0738e+002	210.0
8.2213e+002	220.0
8.3533e+002	230.0
8.4717e+002	240.0
8.5782e+002	250.0
8.6743e+002	260.0
8.7614e+002	270.0
8.8410e+002	280.0
8.9141e+002	290.0
8.9820e+002	300.0

9.0457e+002	310.0
9.1059e+002	320.0
9.1638e+002	330.0
9.2203e+002	340.0
9.2753e+002	350.0
9.3289e+002	360.0
9.3812e+002	370.0
9.4322e+002	380.0
9.4821e+002	390.0
9.5309e+002	400.0
9.5787e+002	410.0
9.6255e+002	420.0
9.6715e+002	430.0
9.7167e+002	440.0
9.7612e+002	450.0
9.8051e+002	460.0

Příloha 3

Tabulka 3. pro určení hodnoty součinitele α (převzato z [2])

d/l	α	d/l	α
0	1	0,82	0,730126
0,02	0,991562	0,84	0,725239
0,04	0,983223	0,86	0,720418
0,06	0,974985	0,88	0,715662
0,08	0,966846	0,9	0,710969
0,1	0,958808	0,92	0,706339
0,12	0,950867	0,94	0,70177
0,14	0,943026	0,96	0,697262
0,16	0,935284	0,98	0,692813
0,18	0,927639	1	0,688423
0,2	0,920093	1,05	0,6777
0,22	0,912643	1,1	0,6673
0,24	0,90529	1,15	0,6573
0,26	0,898033	1,2	0,6475
0,28	0,890871	1,25	0,6381
0,3	0,883803	1,3	0,629
0,32	0,876829	1,35	0,6201
0,34	0,869948	1,4	0,6115
0,36	0,863159	1,45	0,6031
0,38	0,856461	1,5	0,595
0,4	0,849853	1,55	0,5871
0,42	0,843335	1,6	0,5795
0,44	0,836905	1,65	0,5721
0,46	0,830563	1,7	0,5649
0,48	0,824307	1,75	0,5579
0,5	0,818136	1,8	0,5511
0,52	0,812049	1,85	0,5444
0,54	0,806045	1,9	0,5379
0,56	0,800125	1,95	0,5316
0,58	0,794285	2	0,5255
0,6	0,788525	2,1	0,5137
0,62	0,782843	2,2	0,5025
0,64	0,77724	2,3	0,4918
0,66	0,771713	2,4	0,4816
0,68	0,766262	2,5	0,4719
0,7	0,760885	3	0,4292
0,72	0,755582	3,5	0,3944
0,74	0,75035	4	0,3654
0,76	0,74519	5	0,3198
0,78	0,7401	10	0,2033
0,8	0,735079		

Příloha 4

Tabulka 4. pro určení hodnot $P(x)$ a $Q(x)$ (převzato z [2])

x	P(x)	Q(x)	x	P(x)	Q(x)
0,1	0,0006	0,05	4,2	0,58848	0,71206
0,2	0,0005	0,1	4,4	0,5925	0,71093
0,3	0,00169	0,14997	4,6	0,59639	0,71037
0,4	0,004	0,19989	4,8	0,60022	0,71016
0,5	0,0078	0,24968	5	0,604	0,17014
0,6	0,01345	0,29919	5,2	0,40769	0,71019
0,7	0,02129	0,34826	5,4	0,61127	0,71024
0,8	0,03163	0,39663	5,6	0,61471	0,71025
0,9	0,04472	0,44397	5,8	0,61799	0,71022
1	0,06076	0,48988	6	0,62109	0,71014
1,1	0,07984	0,53392	6,2	0,62401	0,71003
1,2	0,10196	0,57558	6,4	0,62674	0,70989
1,3	0,12696	0,61435	6,6	0,62929	0,70973
1,4	0,15457	0,64971	6,8	0,63169	0,70957
1,5	0,18436	0,68122	7	0,63393	0,70941
1,6	0,2158	0,70854	7,2	0,63603	0,70926
1,7	0,24825	0,73144	7,4	0,638	0,70912
1,8	0,28104	0,74989	7,6	0,63987	0,70899
1,9	0,31347	0,76389	7,8	0,64163	0,70888
2	0,3449	0,77378	8	0,64329	0,70877
2,1	0,37477	0,77991	8,2	0,64488	0,70868
2,2	0,40264	0,78276	8,4	0,64638	0,70859
2,3	0,4282	0,78286	8,6	0,64782	0,70852
2,4	0,45127	0,78078	8,8	0,64919	0,70845
2,5	0,47179	0,77704	9	0,65049	0,70838
2,6	0,4898	0,77213	9,2	0,65174	0,70832
2,7	0,50542	0,7665	9,4	0,65294	0,70827
2,8	0,51884	0,7605	9,6	0,65409	0,70822
2,9	0,53027	0,75543	9,8	0,65519	0,70817
3	0,53994	0,74852	10	0,65624	0,70813
3,1	0,5481	0,74291	12	0,66483	0,7078
3,2	0,55496	0,73774	14	0,67095	0,70761
3,3	0,53074	0,73306	16	0,67551	0,70748
3,4	0,56562	0,7289	18	0,67906	0,7074
3,5	0,56979	0,72526	20	0,68189	0,70735
3,6	0,57338	0,72215	22	0,6842	0,7073
3,7	0,57652	0,71951	24	0,68611	0,70726
3,8	0,57931	0,71731	26	0,68772	0,70726
3,9	0,58184	0,71522	28	0,68917	0,70728
4	0,58418	0,71408	30	0,69044	0,70717