

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh studeného kelímku pro tavení TiAl

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Josef KUBEŠ**
Osobní číslo: **E18N0067P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Návrh studeného kelímku pro tavení TiAl**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování

1. Uveďte potřebnou teorii pro řešení elektromagnetického a teplotního pole.
2. Zpracujte problematiku studených kelímků s důrazem na jejich použití při tavení kovů a zejména s ohledem na tavení TiAl.
3. Na základě numerického modelu navrhnete provedení studeného kelímku pro tavení TiAl v zařízení FRQ_60.
4. Proveďte verifikaci při reálném provozu zařízení.
5. Uveďte poznatky a závěry pro praxi.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Nacke, B., Baake, E.: Induktives Erwärmen
2. Lupi, S., Forzan, M., Aliferov, A., Induction and Direct Resistance Heating Theory and Numerical Modeling
3. Muhlbauer, A.: History of Induction Heating and Melting by Alfred Muhlbauer

Vedoucí diplomové práce: **Ing. David Rot, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**




Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan

LS.


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

V Plzni dne 4. října 2019

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá principem a postupem při tavně ve studeném kelímku. Práce je zaměřena především na tavení elektricky vodivých, okrajově i nevodivých materiálů. V první části jsou uvedeny základní obecné poznatky o technologii. Další část se věnuje popisu konstrukčního provedení jednotlivých částí tavní pece společně s procesem tavní samotné. Následně je proveden návrh pece pro reaktivní titanové slitiny s ohledem na elektromagnetické i teplotní pole. Závěrem jsou zde zpracována porovnání s již provedenými tavnami, což umožňuje ověřit správnost navrhovaného řešení.

Klíčová slova

Indukční ohřev, studený kelímek, hloubka vniku, reaktivní kovy, konstrukce pece, chlazení, titan, titanové slitiny, tavná, ANSYS, numerický model, Ti-6Al-4V, verifikace

Abstract

The diploma thesis is dealing with the principle and the procedure of the cold crucible induction melting technology. The paper is focused mainly on melting of the electrically conductive, marginally also non-conductive, materials. The first part presents common basic information about the technology. The next part is devoted to a description of the design of individual parts of the furnace along with the description of the melting process itself. Subsequently, a design of the furnace construction is conducted for reactive titanium alloys with respect to electromagnetic and temperature fields. In the final part, it is compiled a comparison with already performed melting processes, which allows verification of the correctness of the proposed solution.

Key words

Induction heating, cold crucible, penetration depth, reactive metals, furnace design, cooling, titanium, titanium alloys, ANSYS, numerical model, Ti-6Al-4V, verification

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 18.6.2020

Josef Kubeš

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. David Rot, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a pomoc při zpracování práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	11
1. TEORIE ELEKTROMAGNETICKÉHO A TEPLOTNÍHO POLE	12
1.1. ODVOZENÍ PARAMETRŮ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE	12
1.1.1 <i>Elektrodynamické potenciály</i>	12
1.1.2 <i>Vektorový potenciál</i>	13
1.1.3 <i>Šíření elektromagnetického vlnění v elektricky vodivém prostředí</i>	15
1.2 POYNTINGŮV ZÁŘIVÝ VEKTOR	16
1.3 ROVNICE TEPLOTNÍHO POLE	17
1.4 VÍŘENÍ TAVENINY.....	18
1.5 HLOUBKA VNIKU	19
1.6 ŘEŠENÍ SDRUŽENÝCH ÚLOH.....	21
1.6.1 <i>Slabě sdrúžené úlohy</i>	22
1.6.2 <i>Kvazi sdrúžené úlohy</i>	22
1.6.3 <i>Silně sdrúžené úlohy</i>	23
2. KONSTRUKCE STUDENÉHO KELÍMKU	25
2.1 KELÍMEK PRO TAVENÍ REAKTIVNÍCH KOVŮ	25
2.2 KELÍMKY PRO TAVENÍ NEVODIVÝCH MATERIÁLŮ.....	28
2.2.1 <i>Kelímek s integrovaným induktorem</i>	28
2.2.2 <i>Segmentový kelímek</i>	28
2.3 INDUKTOR	31
2.4 KOMORA	33
2.5 CHLADÍCÍ SYSTÉM	34
2.6 VYSOKOFREKVENČNÍ GENERÁTOR	36
3. TAVENÍ VE STUDENÉM KELÍMKU	37
3.1 TAVENÍ ELEKTRICKY VODIVÝCH MATERIÁLŮ.....	37
3.1.1 <i>Titan</i>	39
3.1.2 <i>Titanové slitiny</i>	41
3.1.3 <i>Slitiny Titanu a Hliníku</i>	42
3.2 TAVENÍ ELEKTRICKY NEVODIVÝCH MATERIÁLŮ.....	44
3.3 ZPRACOVÁNÍ ROZTAVENÉHO MATERIÁLU	45
3.3.1 <i>Lití kovů</i>	45
3.3.2 <i>Chlazení a krystalizace oxidů</i>	46
4. NUMERICKÝ MODEL	48
4.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ.....	48
4.2 NÁVRH MODELU.....	49
4.2.1 <i>Geometrický návrh</i>	49
4.2.2 <i>Parametry modelu</i>	52
4.2.3 <i>Způsoby řešení</i>	54
4.2.4 <i>Mesh</i>	54
4.3 ZJEDNODUŠENÝ VÝPOČET	55
5. SIMULACE INDUKČNÍHO OHŘEVU	57
5.1 ELEKTRICKÁ SIMULACE INGOTU.....	57
5.1.1 <i>Rozložení proudové hustoty</i>	57
5.1.2 <i>Rozložení Jouleových ztrát</i>	58

5.1.3 Magnetická indukce a intenzita magnetického pole	59
5.2 TEPLTNÍ POLE VÁLCOVÉ VSÁZKY	60
5.3 FORMOVÁNÍ HOMOLE	65
6. VERIFIKACE VÝSLEDKŮ	70
6.1 NUMERICKÉ OVĚŘENÍ ELEKTRICKÉ SIMULACE.....	70
6.2 NUMERICKÉ OVĚŘENÍ TEPLTNÍ SIMULACE	73
ZÁVĚR.....	79
SEZNAM LITERATURY	81
PŘÍLOHY	85

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Název	Rozměr
E	intenzita elektrostatického pole	V/m
H	intenzita magnetického pole	A/m
B	magnetická indukce	T
γ	konduktivita	S/m
ϵ	permitivita	F/m
μ	permeabilita	H/m
μ_r	relativní permeabilita	–
μ_0	permeabilita vakua	H/m
ϵ_r	relativní permitivita	–
ϵ_0	permitivita vakua	F/m
W_m	energie magnetického pole	J
W_e	energie elektrického pole	J
V	objem	m ³
N	Poyntingův zářivý vektor	W/m ²
c_p	měrné teplo materiálu	J/(Kg·K)
b	šířka segmentu	m
Q	energie	J
ϑ	teplota	K
λ	koeficient měrné tepelné vodivosti	W/(m·K)
n_{seg}	počet segmentů	–
K	konstanta	–
P_1	příkon na jednotku plochy	W/m ²
ρ	hustota	kg/m ³
h	výška vsázky	m
k	konstanta šíření elektromagnetického vlnění	–
α	fázová konstanta	–
β	konstanta měrného útlumu	–
a	hloubka vniku	m
x_2	argument cylindrické funkce	–
T	teplota	K
R_2	poloměr ingotu a základny homole	m
r_3	vnitřní poloměr kelímku	m

Značka	Název	Rozměr
R_3	vnější poloměr kelímku	m
h_{dno}	výška dna kelímku	m
h_{wall}	výška stěn kelímku	m
r_{chlad}	poloměr chladících kanálů	m
r_1	poloměr cívky	m
n_{coil}	počet závitů cívky	–
r_{h1}	vrchní poloměr komolého jehlanu homole	m
h_{h1}	výška komolého jehlanu homole	m
S_{dno}	plocha dna kelímku	m^2
m	hmotnost	kg
Q_{tav}	energie pro roztavení ingotu	kJ
q	tepelný tok dnem kelímku	kW/m^2
ΔP_{dno}	výkonové ztráty dnem	W
r_{11}	poloměr chlazení cívky	m
Q_g	generované teplo	J

Úvod

Práce je zaměřená na návrh ohřevu slitin titanu prostřednictvím elektromagnetické indukce s využitím studeného kelímku. Problematika tavení materiálu ve studeném kelímku je rozpracována s ohledem především na využití pro tavení reaktivních kovů.

V úvodu budou rozvedeny teoretické základy, potřebné pro průběh indukčního tavení a následnou numerickou simulaci. Vzhledem k orientaci této práce jsou tak rozpracovány teoretické základy šíření elektromagnetické energie a současně i náležitosti pro výpočet teplotních polí. Dále jsou zde zpracovány důležité skutečnosti, jakými jsou například hloubka vniku, či teoretický popis možných způsobů řešení numerický úloh.

Nezanedbatelnou část této práce tvoří popis konstrukčních náležitostí studeného kelímku a jeho jednotlivých dílů. Zvláštní pozornost je zde věnována především konstrukčnímu provedení samotného kelímku a také napájecí cívice. Ačkoliv je práce zaměřena především na pece pro tavení reaktivních kovů, je zde pro širší perspektivu popsáno i porovnání konstrukčních rozdílů studeného kelímku pro tavení oxidů.

Dále je v práci věnován prostor průběhu samotného tavení a taktéž vlastnostem titanu a jeho možných slitin. Opět je zde využito porovnání tavení reaktivních kovů a oxidů, aby byly zřetelné rozdíly nutné pro jejich zpracování. Popis vlastností titanu a jeho slitin poté umožňuje posouzení využití titanu v jednotlivých aplikacích a vliv jednotlivých příměsí na jeho vlastnosti. Samotnou kapitolu zakončuje odstranění již roztavené vsázky společně s bezprostředním zpracováním.

Hlavním cílem této práce je samotný návrh pece, pro tento účel je součástí diplomové práce numerická simulace, ta je zde rozčleněna do dvou částí. První část je samotný návrh numerického modelu. Ten podrobně rozepisuje způsob výpočtů, návrhy jednotlivých geometrických částí a definuje okrajové podmínky. Druhá část se poté sestává z výsledků simulace. Tyto výsledky zahrnují jednotlivé simulace elektrických i tepelných průběhů a poskytují tak výsledný obraz o průběhu tavby.

V závěru je pro ověření navržené simulace využito porovnání s již provedenými tavbami. To umožňuje posouzení správnosti navržené simulace pomocí porovnání s reálnými výsledky.

1. Teorie elektromagnetického a teplotního pole

Indukční ohřev a jeho aplikace pro ohřev materiálu je velmi důležitou součástí tvorby vysokojakostních materiálů. Lze je využít pro tepelnou úpravu vodivých a v některých případech i nevodivých materiálů pomocí působení střídavého elektromagnetického pole. [9]

Popis tohoto pole je definován pomocí Maxwellových rovnic, které charakter tohoto pole popisují. [4]

1.1. Odvození parametrů elektromagnetického pole

1.1.1 Elektrodynamické potenciály

Pro řešení polí elektromagnetické indukce uvažujeme proměnné, tzv. nestacionární magnetické pole, proto pro přítomnost elektromagnetického pole již není splněna Maxwellova rovnice. [4]

$$\oint \vec{E} \, dl = 0 \quad (1.1.1.1)$$

Při uvažování izotropního prostředí, které charakterizují materiálové konstanty μ , ϵ , γ se šíří elektromagnetické vlnění, jehož průběh je popsán pomocí prvních dvou Maxwellových rovnic v diferenciálním tvaru [5] :

$$\text{rot } \vec{H} = \gamma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1.1.1.2)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\mu \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (1.1.1.3)$$

Pokud poté uvažujeme pro úpravu vzorce pro E násobení obou stran rotací a následně dosadíme vzorec H:

$$\text{rot rot } \vec{E} = -\text{rot } \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \text{rot } \vec{B} \quad (1.1.1.4)$$

$$\text{rot rot } \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\mu \gamma \vec{E} + \mu \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (1.1.1.5)$$

Výraz dvojité rotace lze následně transformovat:

$$\text{rot rot } \vec{E} = \text{grad div } \vec{E} - \nabla^2 \vec{E} = -\nabla^2 \vec{E} \quad (1.1.1.6)$$

Zde je $\nabla^2 \vec{E}$ operátor diferenciální Laplaceovy transformace vektoru E

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu\gamma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 \quad (1.1.1.7)$$

Podobným způsobem lze vyjádřit i vztah pro vektor H:

$$\text{rot rot } \vec{H} = -\mu\gamma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (1.1.1.8)$$

$$\text{rot rot } \vec{H} = \text{grad}(\text{div } H) - \nabla^2 \vec{H} \quad (1.1.1.9)$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} - \mu\gamma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = 0 \quad (1.1.1.10)$$

Tyto rovnice poté popisují elektromagnetické vlnění pro vektory H a E, a to v prostředí s konstantními materiálovými vlastnostmi μ , ϵ , γ . Stejně vzorce lze následně použít i pro vektory D, J a H. Je však nutné počítat s jejich vzájemným vztahem k vektorům B a D. [5]

1.1.2 Vektorový potenciál

Protože v nestacionárním magnetickém poli neplatí rovnice (1.1.1.1), není splněna nutná a postačující podmínka pro existenci elektrického pole k tomu, aby bylo možné elektrické pole vyjádřit tvarem. [4]

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi \quad (1.1.2.1)$$

Proto je nutné nestacionární magnetické pole definovat jako potencionální a zavést potenciál A

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \quad (1.1.2.2)$$

Dle toho následně dosadíme do II. Maxwellovy rovnice pro magnetickou indukci v diferenciálním tvaru

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \operatorname{rot} \vec{A} = -\operatorname{rot} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (1.1.2.3)$$

V bodech, kde tato Maxwellova rovnice v diferenciálním tvaru platí, následně existuje diferencovatelná a spojitá funkce polohy φ v tvaru

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\operatorname{grad} \varphi \quad (1.1.2.4)$$

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{E}_v + \vec{E}_i \quad (1.1.2.5)$$

Veličiny \vec{A} , φ definované pro nestacionární pole jsou zvané elektrodynamické potenciály. Kdy φ je veličina skalárního elektrodynamického potenciálu a \vec{A} elektrodynamický potenciál vektorový. [4]

Při následném dosazení do I. Maxwellovy rovnice je při výpočtu kvazistacionárních polí uvažována podmínka kvazistacionarity, kdy $\gamma \gg \epsilon\omega$, lze tak zanedbat účinky Maxwellova posuvného proudu. [37]

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \gamma \vec{E} \quad (1.1.2.6)$$

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{A} = \vec{J}_v - \gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (1.1.2.7)$$

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{A} + \gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_v \quad (1.1.2.8)$$

Pokud uvažujeme lineární permeabilitu lze tento tvar rovnice upravit

$$\operatorname{grad}(\operatorname{div} \vec{A}) - \Delta \vec{A} + \mu\gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \mu \vec{J}_v \quad (1.1.2.9)$$

S využitím Coulombovy kalibrační podmínky $\operatorname{div} \vec{A} = 0$ nabývá výsledný vztah tvaru

$$-\Delta \vec{A} + \mu\gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \mu \vec{J}_v \quad (1.1.2.10)$$

1.1.3 Šíření elektromagnetického vlnění v elektricky vodivém prostředí

Harmonicky proměnná elektromagnetická pole lze odvodit vyjádřením komplexní vlnové rovnice. [4]

$$\Delta \bar{H} - j\omega\gamma\mu\bar{H} + \omega^2\varepsilon\mu\bar{H} = 0 \quad (1.1.3.1)$$

$$\Delta \bar{H} + (\omega^2\varepsilon\mu - j\omega\gamma\mu)\bar{H} = 0 \quad (1.1.3.2)$$

Z rovnice lze následně definovat konstantu šíření

$$\Delta \bar{H} + k^2\bar{H} = 0 \quad (1.1.3.3)$$

$$\bar{k}^2 = \omega^2 \left(\varepsilon - j \frac{\gamma}{\omega} \right) \mu = \omega\mu(\omega\varepsilon - j\gamma) \quad (1.1.3.4)$$

Komplexní konstantu šíření lze definovat vztahem pro reálnou a imaginární část

$$\bar{k} = \alpha - j\beta \quad (1.1.3.5)$$

Reálnou část této rovnice lze dle podmínky kvazistacionarity zanedbat. Pro prostředí tvořené elektricky vodivými materiály vodivost γ značně převyšuje permitivitu ε . Rovnice šíření tedy poté bude rovna

$$\bar{k} = -j\beta \quad (1.1.3.6)$$

$$\bar{k}^2 = -j\omega\gamma\mu \quad (1.1.3.7)$$

$$\bar{k} = \pm \frac{1-j}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega\gamma\mu} \quad (1.1.3.8)$$

Reálná část této rovnice je poté

$$k_{real} = \sqrt{\frac{\omega\gamma\mu}{2}} = \frac{1}{a} \quad (1.1.3.9)$$

Z tohoto vzorce lze následně vyjádřit hloubku vniku popisující průnik elektromagnetického vlnění do vodivého prostředí.

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}} \quad (1.1.3.10)$$

1.2 Poyntingův zářivý vektor

Poyntingův zářivý vektor S popisuje hustotu a směr energie elektromagnetismu prostorem. Vektor je závislý na intenzitě elektrického a magnetického pole. Jeho definice odpovídá množství energie v daném objemu, která je úměrná danému zářivému vektoru. [5]

V daném objemu prostoru je množství magnetické a elektrické energie dáno:

$$W_m = \frac{1}{2} \int_0^V \vec{B} \vec{H} dV = \frac{1}{2} \mu_0 \mu_r \int_0^V \vec{H}^2 dV \quad (1.2.1)$$

$$W_e = \frac{1}{2} \int_0^V \vec{D} \vec{E} dV = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r \int_0^V \vec{E}^2 dV \quad (1.2.2)$$

Tato energie každého z bodů je časově proměnná. Rychlost její změny odpovídá vzrůstu energie v daném objemu. [5]

$$-\frac{\partial}{\partial t}(W_e + W_m) = - \int_0^V \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}^2 + \frac{1}{2} \mu_0 \mu_r \vec{H}^2 \right) dV \quad (1.2.3)$$

$$-\frac{\partial}{\partial t}(W_e + W_m) = - \int_0^V \frac{\partial}{\partial t} \left(\varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu_0 \mu_r \vec{H} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) dV \quad (1.2.4)$$

Pokud zde dosadíme z první a druhé Maxwellovy rovnice získáme tvar rovnice

$$-\frac{\partial}{\partial t}(W_e + W_m) = \int_0^V \frac{\partial}{\partial t} (\gamma \vec{E}^2 + \text{div } \vec{E} \times \vec{H}) dV \quad (1.2.5)$$

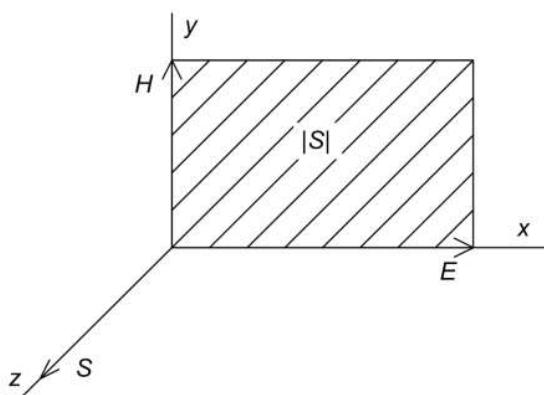
Kdy dle Gauss-Ostrogradského poučky objemový integrál nahradíme integrálem plošným

$$-\frac{\partial}{\partial t}(W_e + W_m) = \int_0^V \gamma \vec{E}^2 dV + \oint \vec{E} \times \vec{H} dA = \int_0^V \gamma \vec{E}^2 dV + \oint N dA \quad (1.2.6)$$

Vzorec výše popisuje úbytek elektromagnetické energie v jednotce objemu za čas. Kdy první člen značí, kolik energie se za vteřinu přemění v teplo v daném objemu, zatímco druhý výraz udává množství energie, které z objemu diverguje. Toto vyzářené množství energie je žadáný Poyntingův zářivý vektor. [5]

$$\vec{N} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (1.2.7)$$

Plošná hustota toku výkonu působí ve směru Poyntingova vektoru. A to v poměru množství energie za vteřinu plochou m^2 kolmou ke směru jeho šíření. Jeho směr určuje vektorový součin a je tak kolmý k ploše tvořené vektory E a H.



Obrázek 1.2.1 Směr Poyntingova vektoru[10]

1.3 Rovnice teplotního pole

Teplotní pole lze fyzikálně popsat jako průměr teplot v každém bodě. Pro řešení rozložení teplotního pole je vhodné použít rovnici, jež popisuje průběh Jouleových ztrát a následného oteplení. Toto lze popsat tzv. Fourier-Kirchhoffovou rovnicí. [7]

Fourier-Kirchhoffova rovnice je speciálním případem energetické rovnice. Za předpokladu pevného skupenství látek, konstantního tlaku, konstantní měrné tepelné kapacity, nulové viskozity a nulové rychlosti ohřívání součástí platí Fourier-Kirchhoffova rovnice. [11]

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = -div(-\lambda grad T) + w_j \quad (1.3.1)$$

Kdy w_j představuje měrné Jouleovy ztráty. Dále je třeba formulovat okrajové a počáteční podmínky na rozhraní teplotního pole.

Podmínky na rozhraní dvou materiálů s různými parametry materiálů vyjadřují, že teploty na obou stranách rozhraní jsou si rovné. Rozdíl toků energie od a k rozhraní je poté roven plošné hustotě energie za jednotku času. [11]

$$T_1 = T_2 \quad (1.3.2)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial \bar{n}} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial \bar{n}} = q \quad (1.3.3)$$

Přičemž pokud na rozhraní nevzniká žádná tepelná energie je plošná hustota výkonu q rovna nule, poté rovnice zní

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial \bar{n}} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial \bar{n}} \quad (1.3.4)$$

U indukčních ohřevů bývá zpravidla prováděn ohřev z nízké teploty k velmi vysoké. Proto je nutno uvažovat přestup tepla konvekcí a radiací, to vede ke vzorci

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial \bar{n}} = \alpha(T_{gass} - T) + \varepsilon c(T_{ext}^4 - T^4) \quad (1.3.5)$$

Pro řešení transportu hmoty, momentu a energie prostřednictvím laminárního proudění a teplotního přenosu se využívá Navier-Stokesova rovnice. [38]

Tento vzorec popisuje spojení mezi rychlostí, tlakem a pohybem kapaliny v 3D prostředí

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \vec{u} = \frac{k}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_g + \phi \quad (1.3.6)$$

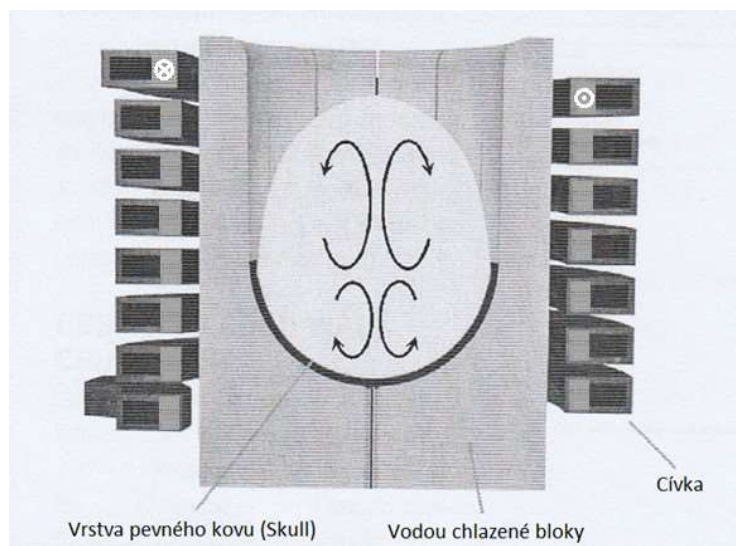
1.4 Víření taveniny

Působení elektromagnetického pole na roztavenou taveninu způsobuje intenzivní víření tekuté vsázky. Toto víření je důležité pro tvorbu homogenizované taveniny a usnadňuje tak legování taveného materiálu. [9]

Směr působení elektrodynamické síly určuje směr proudu uvnitř vsázky a magnetické indukce napájecí cívky. [7]

Vzdutí roztavené vsázky lze řídit změnou výkonu pece či změnou frekvence

výstupního proudu generátoru. Je však možné vzdutí změnit například i změnou pozice samotné pecní cívky. Při vhodné konfiguraci cívky a napájecího proudu lze následně vytvarovat rovnoměrnou homoli.



Obrázek 1.4.1 Směr působení elektrodynamických sil ve studeném kelímku [33]

Na intenzitu víření působí i rozdílné teploty uvnitř tekuté vsázky. Ty způsobují přirozený směr působení tepla vzhůru. Materiál s vyšší teplotou a současně nižší hustotou je tak samovolně vytlačován k vrcholu homole.

Elektromagnetické síly v segmentovém kelímku tak zajišťují víření taveniny a zároveň i formování samotné homole. Zformování homole sníží plochu kontaktu s vodou chlazeným kelímkem a tím i tepelné ztráty odvedené chlazením.

Pro případ užití kelímkové pece lze popsat výšku vzdutí taveniny vzorcem :

$$h = K \frac{p_1}{\rho} \sqrt{\frac{\mu_r \gamma}{f}} \quad (1.4.1)$$

1.5 Hloubka vniku

Hloubka vniku popisuje pronikání elektromagnetické energie do elektricky vodivé vsázky.

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}} \quad (1.5.1)$$

Kdy dle jeho velikosti lze ovlivnit rozložení elektromagnetické energie, jakož i tepla uvnitř vsázky. Pro aplikace povrchového ohřevu je tedy vhodné volit nízkou hodnotu hloubky vniku, energie je poté přenesena pouze do povrchu.

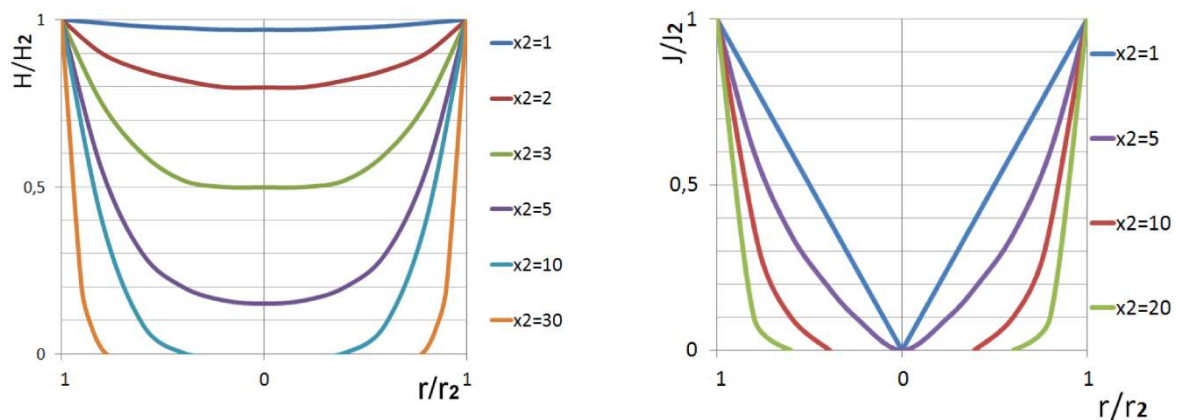
Samotný rozměr je definován jako vzdálenost od povrchu materiálu, kdy dojde k útlumu proudové hustoty k $1/e$ tzn 37 % z hodnoty na povrchu vsázky. Zatlumena však není pouze proudová hustota, ale i ostatní veličiny. [29]

V případě tavení však volíme hloubku vniku větší, tak aby došlo k rovnoměrnému prohřátí celé vsázky.

Jak vyplývá ze vzorce, je velikost toho parametru závislá na permeabilitě a elektrické vodivosti materiálu, tyto parametry jsou dány samotnou vsázkou. Proces řízení hloubky vniku tak závisí na volbě vhodné frekvence, tu ovlivníme výstupní frekvenci proudu generátoru napájejícího indukční cívku.

Pro popis průniku se také používají argumenty cylindrické funkce x_2 .

$$x_2 = \frac{r_2 \sqrt{2}}{a} \quad (1.5.2)$$



Obrázek 1.5.1 Rozložení parametrů dle argumentu x_2 intenzity magnetické pole (vlevo) a proudové hustoty (vpravo) [7]

S jeho pomocí lze vyjádřit pronikání proudové hustoty či intenzity magnetického pole v závislosti na velikosti argumentu x_2 . Kdy s rostoucím argumentem x_2 klesá hloubka vniku. Jak je vidět výše, při nižším kmitočtu dochází k linearizaci průběhu proudové hustoty vsázku, zatímco při vyšších kmitočtech jsou parametry s rostoucí vzdáleností od povrchu více zatlumeny.

Dle velikosti argumentu x_2 lze poté určit, jak brzy dojde k zatlumení vstupních veličin ve vloženém materiálu. Při velké hodnotě hloubky vniku s ohledem na malou velikost daného objektu může dojít k elektromagnetické průžařnosti.

V takovém případě by nedošlo k zatlumení velikosti proudové hustoty v materiálu a nedošlo by tak k přenosu výkonu. V takové případě by poté nenastal růst teploty. V grafu výše toto minimální zatlumení reprezentuje velikost argumentu x_2 rovno jedné.

Pro tavení titanu se poté obvykle používá argument velikosti okolo 3-6 v závislosti na průměru tavené vsázky.

1.6 Řešení sdružených úloh

Výpočty indukčních ohřevů se zabývají analýzou několika provázaných polí. Pole elektromagnetické zde prostřednictvím distribuce vířivých proudů úzce souvisí s teplotním polem reprezentovaným teplem vznikajícím ve vsázce a v neposlední řadě i mechanickým namáháním způsobeným silovými účinky proudů a pohybem materiálu taveniny. [6]

Konečná simulace tak závisí na konkrétní konfiguraci systému řešení. Kdy je nutné uvažovat alespoň elektromagnetické jevy vyvolávající vznik tepelné energie prostřednictvím Jouleových ztrát a též materiálové vlastnosti, které tyto elektromagnetické a teplotní síly ovlivňují. [6]

Vzhledem k nelineárnosti těchto řešení je nutné aplikovat algoritmy a numerické postupy, které umožní řešení těchto problémů. Obtížnost řešení se ještě stupňuje společně s faktem rychlých elektromagnetických jevů korespondující se značně delšími časovými konstantami pole teplotního. Kdy řešení elektromagnetických polí pracuje s konstantami jednotek milisekund, zatímco konstanty pro šíření teplotních polí nabývají stovek milisekund i sekundových hodnot. [6]

Spojení těchto polí lze realizovat slabými, kvazi a silně sdruženými úlohami.

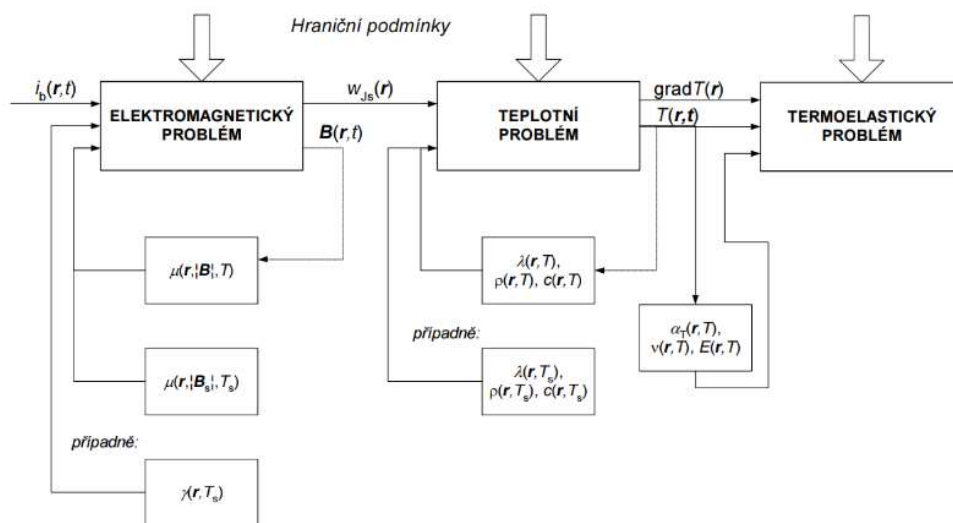
1.6.1 Slabě sdružené úlohy

Formulace slabě sdružených úloh je nejjednodušším přístupem pro řešení těchto úloh. Metoda využívá dvoustupňový algoritmus využívající postupného řešení elektromagnetického pole a až poté následné tepelné výpočty. Materiálové vlastnosti jsou v tomto systému řešení brány jako konstantní. [6]

Výhodou toho systému řešení je zkrácení doby výpočtu, což umožní snazší analýzu úloh. Nevýhoda toho způsobu spočívá v zanedbání tepelných změn elektrické i tepelné vodivosti, ty se v případě některých materiálů mohou zanedbatelně lišit, v případě feromagnetických prvků nepřesnost výpočtu ovlivňuje i teplotní závislost relativní permeability. [6]

Vzhledem k možným nepřesnostem je tento systém vhodný pro použití nízkoteplotních ohřevů či materiálů, jejichž parametry se s teplotou příliš nemění. [6]

Pro zvětšení přesnosti toho systému řešení jsou voleny parametry ze střední teploty ohřevu. Při ohřevu na 1000°C jsou tak zvoleny materiálové parametry odpovídající 500°C.



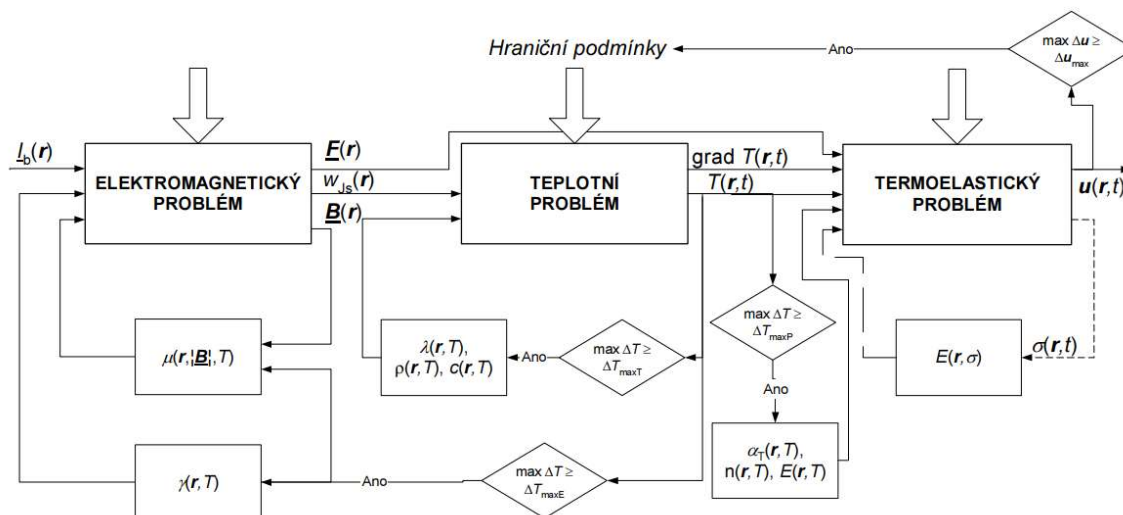
Obrázek 1.6.1 Algoritmus slabě sdružené úlohy [31]

1.6.2 Kvazi sdružené úlohy

Tato metoda vyžaduje iterační postup, kdy oproti slabě sdružené dochází k úpravě materiálových vlastností podle hodnot elektromagnetického a teplotního pole. [6]

Při výpočtu jsou oproti silně sdruženým úlohám uvažována ustálená

elektromagnetická pole. Výpočet tepelného pole je tak poté upravován dle jednotlivých ustálených elektromagnetických polí. Výpočet poté probíhá do doby, než je splněna globální konvergence. [6]



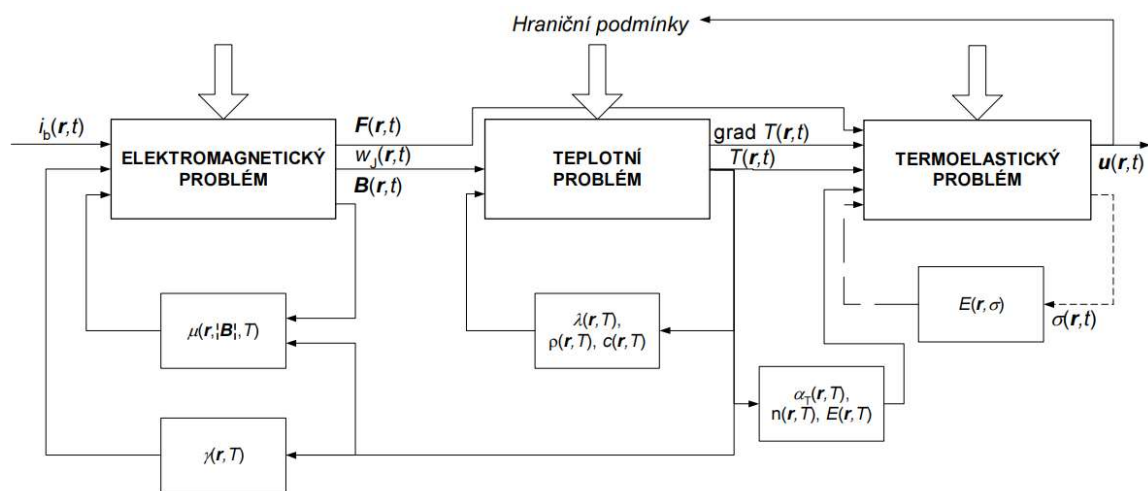
Obrázek 1.6.2 Algoritmus kvazi sdužené úlohy [31]

Tato metoda je náročnější, než metoda slabě sdužené úlohy, avšak lze s ní dojít k přesnějším výsledkům.

1.6.3 Silně sdužené úlohy

Poslední přístup sdužených úloh je řešení silně sdužené úlohy. Jako nejnáročnější z nich, je využívána jen při nutnosti přesných výsledků. Vysoká výpočetní náročnost silně sdužené úlohy spočívá v plném výpočtu sdužených polí. Tato pole jsou ovlivňována korekcemi materiálových vlastností, které se působením ostatních polí mění. [6]

Vzhledem k vzájemně se ovlivňujícím polím výpočet probíhá až do dosažení ukončovací podmínky. Tato metoda je tak velmi náročná. Její aplikace je vhodná tam, kde dochází k velkým změnám materiálních vlastností, kupříkladu ohřev oceli k teplotám lehce nad Curieovým bodem. [6]



Obrázek 1.6.3 Algoritmus silně sdružené úlohy [31]

2. Konstrukce studeného kelímku

Studený kelímek je vhodnou aplikací pro tavení vysokoteplotních materiálů, jejichž bod tavení přesahuje i 3000°C. Další možnou aplikací je tavení reaktivních materiálů, kdy je nutná regulace atmosféry a nádoba, která nereaguje s taveným materiálem.

2.1 Kelímek pro tavení reaktivních kovů

Nádoba na materiál, tzv. kelímek je v případě tavení reaktivních kovů tvořena z měděného výkovku. Měď se zde používá pro její dobrou tepelnou vodivost, která umožňuje snadný přenos tepla k chlazení.

V případě tavení reaktivních slitin je kelímek složen z měděných segmentů. To zabraňuje případnému pohybu segmentů, u kterých by mohlo dojít k vodivému spojení se využívá systém vyfrézovaných drážek. Ty jsou mechanicky pevnější, než segmenty tvořené z trubek, které jsou využity pro tavení oxidů.

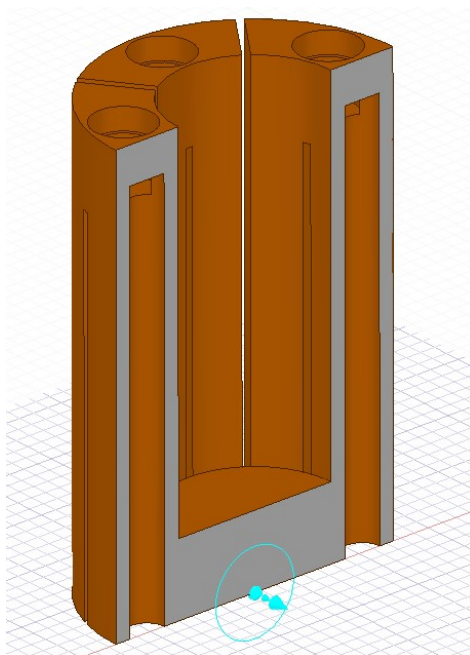


Obr. 2.1.1 Kelímek pro tavení kovů [25]

V této konstrukci jsou následně ze spodní části vrtány otvory dosahující téměř k vrcholu segmentů. Dva z těchto otvorů následně spojuje otvor z horní části, ten je z vrchu následně uzavřen, a tak vytváří uzavřený chladicí okruh segmentu.

Uvnitř segmentů proudí chladicí voda, která odvádí teplo ze segmentů ohříváných

taveným materiálem umístěným uvnitř pole segmentů. Kelímek samotný tedy zůstává na značně nižší teplotě než tavenina uvnitř.



Obr. 2.1.2 Model řezu vyfrézovaného vrtaného kelímku

Materiál pro tento kelímek musí mít nízký elektrický odpor společně s dobrou tepelnou vodivostí, obvykle tak bývá zvolena měď. Tyto vlastnosti zajišťují dobrý odvod tepla přestupujícího z taveniny a udržují tak kelímek chlazený, to následně umožňuje konstrukci zamezit vlivům styku s taveninou. [25]

Okolo kelímku je navinutý induktor vybudující elektromagnetické pole. Toto elektromagnetické pole vyvolává vířivé proudy a tím ohřívá vsázku umístěnou uvnitř měděných trubek. Konstrukce je tak velmi podobná kelímkovým pecím. [3,10]

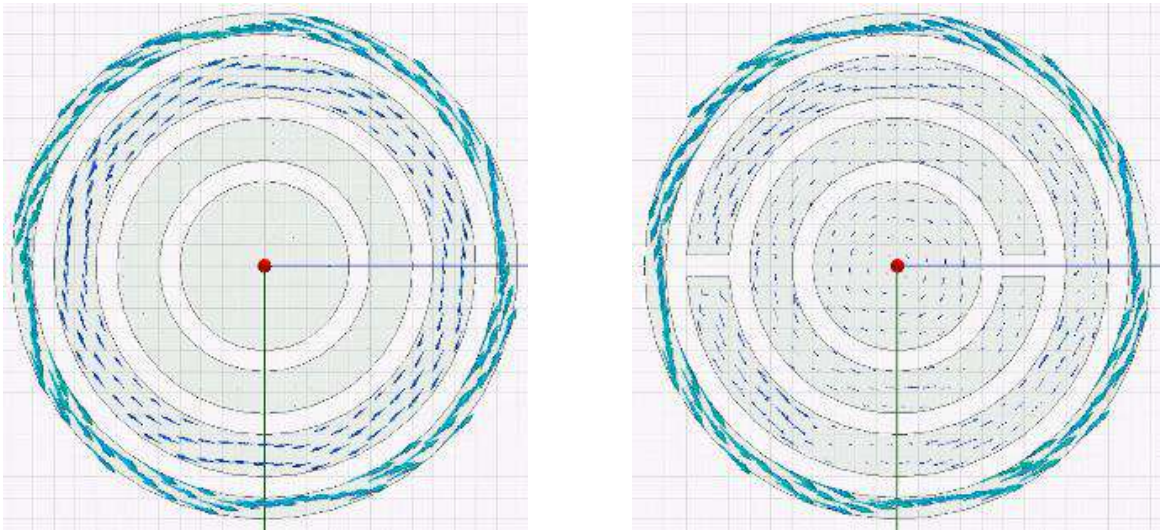
Parametry	Kovy	Oxidy
Elektrická vodivost v tekutém stavu [$1/\Omega\text{m}$]	$(1-5) \times 10^6$	$(0,4-5) \times 10^3$
Frekvence [kHz]	0,05-10	440-5280
Energetická spotřeba [kWh/kg]	0,6-10	1,5 - 10
Přestup tepla do kelímku [kW/m ²]	900-5000	100-1000
Tloušťka skullu [mm]	Zanedbatelná	2-20
Efektivita tavby [%]	5-7	85-90
Atmosféra	Inertní či vakuum	Řízený přívod atmosféry

Tab. 1: Porovnání tavby kovů a oxidů [1]

Jak je zřejmé výše, elektrická vodivost kovů je signifikantně větší než u tavení oxidů již při tekutém stavu. Tento rozdíl se značně zvyšuje vzhledem k přítomnosti skullu u tavení oxidů. Ačkoliv je velmi tenká vrstva skullu přítomna i při tavení reaktivních kovů, její dobrá tepelná a elektrická vodivost i při pevném stavu snížení odvodu tepla příliš nezabraňuje.

Proto i při sníženém kontaktu materiálu se segmentovým kelímkem vlivem víření taveniny je tedy odvod tepla při tavení kovů násobně větší. Tento odvod tepla zapříčiňuje značně nižší účinnost pece a větší nároky na chladicí systém.

Mezi jednotlivými segmenty je nutno držet mezeru umožňující přenos výkonu do vsázky, vzdálenost musí být dostatečná pro napětí mezi stěnami. Při vodivém spojení jednotlivých segmentů by následně docházelo k ohřevu samotného segmentového kelímku, a nikoliv vsázky uvnitř.



Obr. 2.1.3 Přestup tepla do vsázky neumožněn (zleva), probíhá (zprava) [25]

Mezeru mezi segmenty je však současně dobré udržovat co nejmenší. V případě přerušení přívodu energie během tavby menší mezery zajistí snížení rychlosti průtoku roztaveného materiálu těmito mezerami. Dostatečné množství vsázky vně segmentového kelímku může vytvořit z kelímku plnou válcovou vsázku a tím jej zničit.

Pro určení vhodného počtu segmentů válcového kelímku lze vycházet ze vztahu

$$n_{seg} \approx \frac{\pi * d}{\frac{\pi * r * \alpha}{180} + 1} \quad (2.1.1)$$

S větším množstvím segmentů taktéž dochází k rovnoměrnějšímu rozložení elektromagnetismu ve vsázce.

2.2 Kelímky pro tavení nevodivých materiálů

2.2.1 Kelímek s integrovaným induktorem

Používají se především dva konstrukční typy. V prvním z nich tvoří stěnu kelímku sám induktor. Kelímek je zde tvořen jedno-závitovou cívkou, případně několika cívkami naskládanými nad sebou. Každý z těchto závitů výsledné cívky je poté samostatně chlazen. Dostatečné chlazení závitů zajistí stálou přítomnost skálu a tím i elektrickou a tepelnou izolaci mezi vsázkou a závitů cívky. [11]



Obr. 2.2.1 Kelímek s integrovaným induktorem [13]

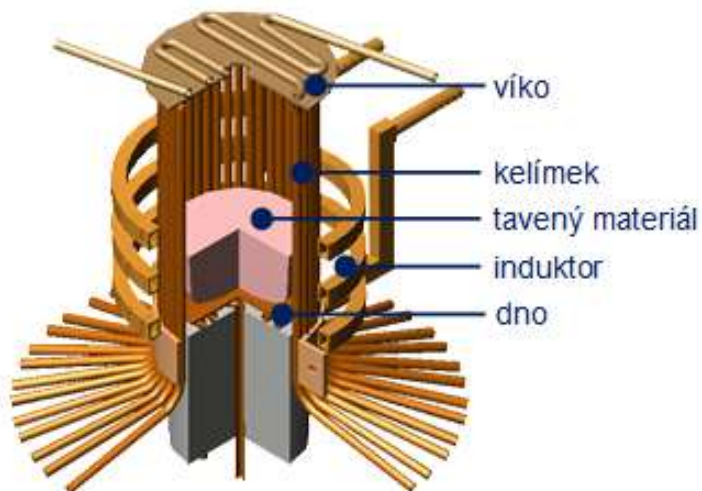
Toto uspořádání je výhodné pro větší účinnosti tavby. Nevýhodou je to, že kelímek a induktor je vzájemně neoddělitelný. Toto konstrukční řešení je vhodné pro tavení některých špatně elektricky vodivých materiálů jako například skel. Oproti tomu oxidy nejsou vhodné, protože nelze vhodně řídit jejich krystalizaci. [10,11]

Tato konstrukce vykazuje vyšší účinnost, avšak vzhledem k nemožnosti použít ji pro tavení reaktivních kovů či oxidů je její využití v reálných aplikacích značně limitováno.

2.2.2 Segmentový kelímek

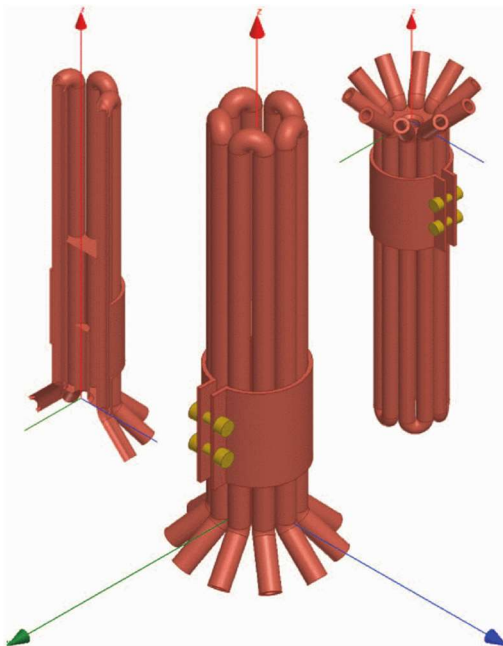
Druhý přístup spočívá v použití segmentového kelímku, ačkoliv je tento kelímek

podobný tomu pro tavení reaktivních kovů, vzhledem k existenci skullu při tavení elektricky nevodivých materiálů je konstrukčně řešen jako trubkový. Tento trubkový systém tvoří bariéru pro vytvořený skull. Samotný skull poté zabraňuje možnému úniku taveniny.



Obr. 2.2.2 Konstrukční provedení studeného kelímku se segmenty na tavení oxidů [3]

Konstrukčně jsou segmenty tvořeny trubicemi spojenými v horní části segmentů. Tyto segmenty jsou tvořeny nemagnetickými kovy, jakými jsou kupříkladu měď či nerezová ocel.

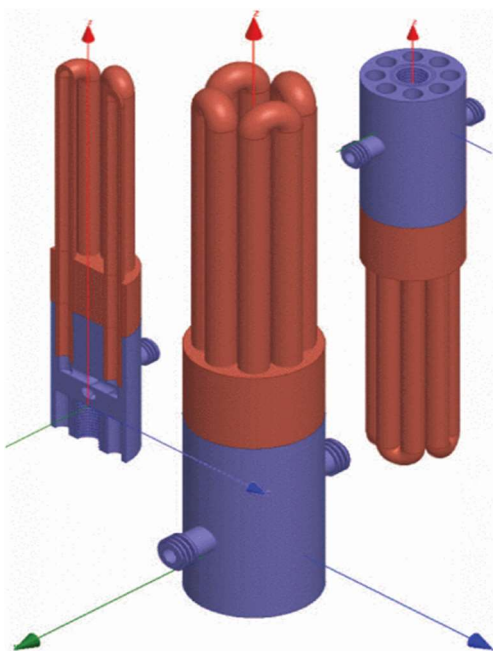


Obr. 2.2.3 Standardní segmentový kelímek s vyfrézovaným dnem [15]

Samotný segmentový kelímek je na Obr. 2.2.3 tvořen masivním dnem z jediného

kusu mědi s vyfrézovanými drážkami na boku. Do těchto drážek jsou poté zasazeny jednotlivé segmenty, které jsou staženy ke dnu měděnou objímkou. [15]

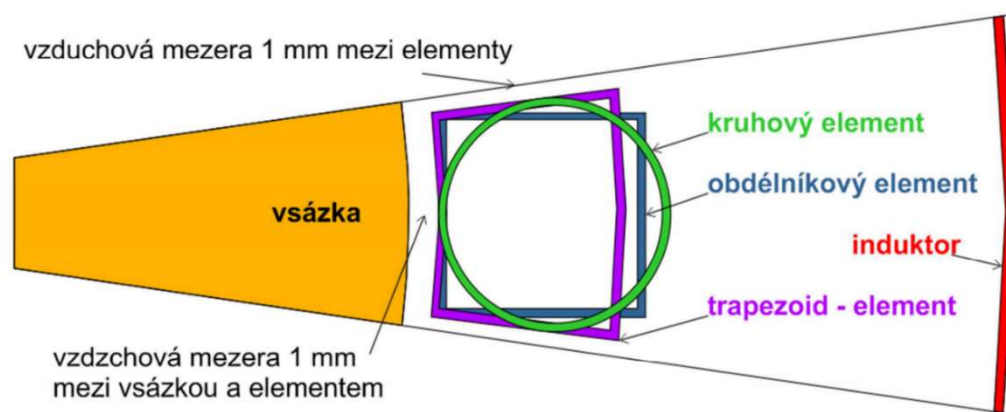
Toto konstrukční řešení kelímku je snazší na výrobu. Nicméně je vzhledem k kelímku složenému z více kusů nutno zajistit dobrou těsnost dílů, aby nemohlo dojít k netěsnosti okrajů dna pece.



Obr. 2.2.4 Segmentový kelímek se základnou ukotvenou do tištěného chladicího okruhu [15]

Segmentový kelímek zasazený do chladicího okruhu Obr. 2.1.4 je oproti předchozí variantě vyroben z jediného kusu mědi. Vzhledem k absenci kontaktu oproti konvenční variantě může docházet k lepšímu přestupu tepla mezi segmenty a dnem kelímku. [15]

Tento díl je následně zasazen do 3D tištěného dílu ten lze navrhnout přímo pro potřeby kelímku a usnadnit tak napojení na chladicí okruh a taktéž zjednodušit napojení onoho chladicího okruhu, kdy konkrétně v této variantě jsou přímo na dílu pouze dva konektory. Toto řešení je však dražší vzhledem ke komplikovanější výrobě celého nesourodého kelímku.



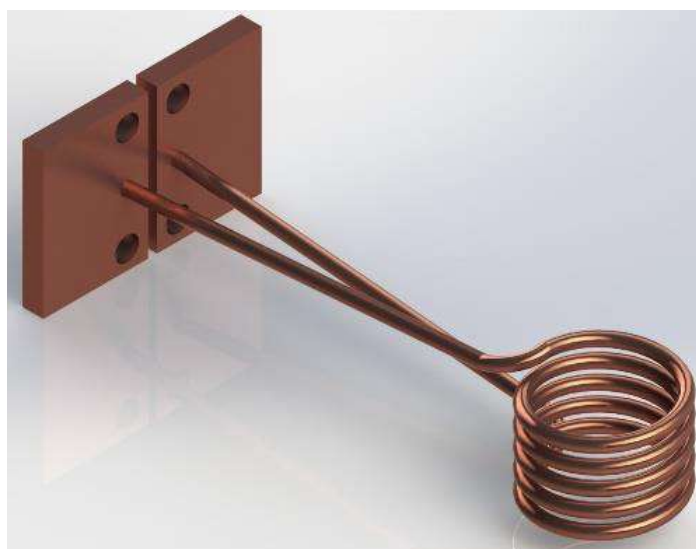
Obr. 2.2.5 Tvary užívaných trubkových segmentů [11]

2.3 Induktor

Induktor uvažujeme jako oddělený pouze pro variantu segmentového kelímku, kdy v případě integrovaného kelímku je induktor přímou součástí kelímku.

V segmentové variantě je cívka navinutá jen s malou mezerou okolo segmentového kelímku. Induktor je napájen z vysokofrekvenčního generátoru a vytváří tak magnetické pole, které indukuje proudy v elektricky vodivé části vsázky.

Cívku je nutné navrhnut s ohledem na ideální přestup proudů do vsázky. Je nutné konfigurovat průřez, počet závitů a rozteč mezi nimi. To vše s ohledem na omezené rozměry kelímku a požadovanou výšku taveniny, ta je obzvláště důležitá při tavení reaktivních kovů, kdy je kontakt taveniny s kelímkem žádoucí minimalizovat. [24]



Obr. 2.3.1 Pecní cívka pro tavení kovů [25]

Cívka samotná bývá navinuta z trubkového vodiče a stejně jako segmentový kelímek je chlazena vodou. Konce této cívky jsou připojené ke generátoru a zakončeny měděnými bloky. Touto dutou část následně proudí chladicí voda. Na těchto blocích jsou následně umístěny otvory pro upevnění ke generátoru.

Běžně je u indukčních tavicích pecí užívána cívka s válcovou geometrií a pevnými rozestupy mezi závitů. To zajišťuje nižší tepelné ztráty, zajišťuje snazší konstrukci samotné cívky a v neposlední řadě zjednodušuje matematické modely a výpočty těchto cívek. [24]

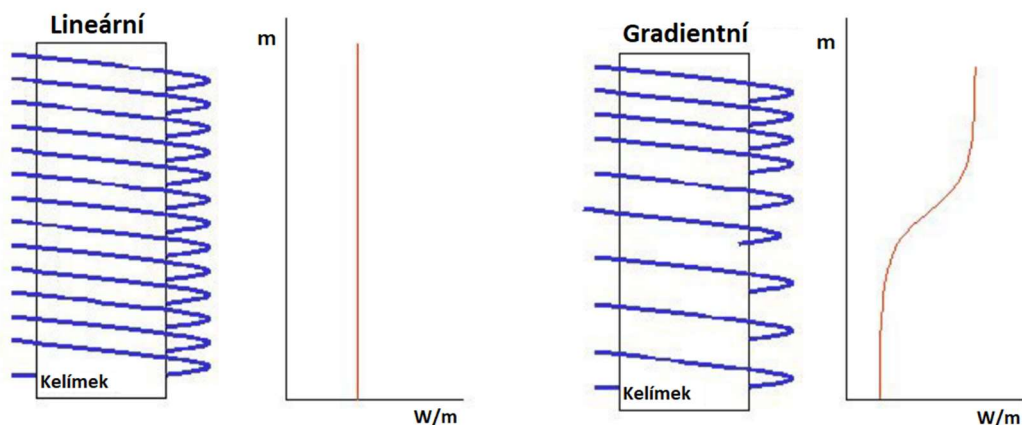
Nevýhoda těchto symetrických cívek spočívá v stejnoměrné indukci podél celé vsázky a energie se tedy indukuje stále ve stejném množství a vzdálenosti podél celé výšky vsázky. V případě žádoucího nestejnoměrného magnetického pole ve výšce segmentového kelímku lze přistoupit ke konstrukčním změnám. [24]

V případě konstrukce lze přihlížet k třem konstrukčním typům, a to k lineárnímu, kuželovitému a symetrickému. [24]

Lineární systém představuje klasickou konstrukci válcovitého kelímku. V případě využití lineární cívky s rovnoměrným počtem závitů podél celého kelímku je magnetické pole ve vsázce ve výšce rovnoměrně rozložené.

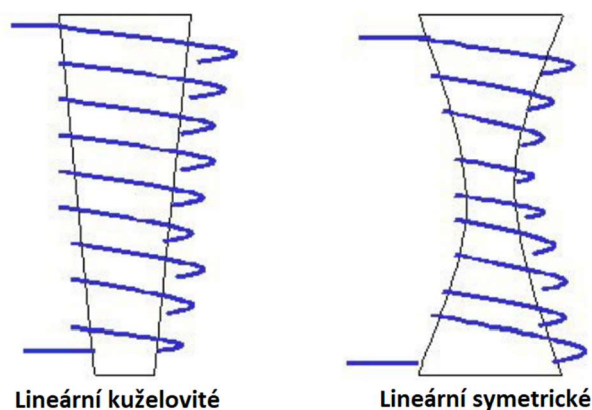
Pokud však použijeme gradientní uspořádání cívky, je cívka stejného průřezu navinuta s postupně se zvětšujícími rozestupy. V případě, kdy je induktor navinut s menšími rozestupy v horní části, dojde k zajištění větší množství energie přestupující do horní části taveniny v kelímku.

Gradientní uspořádání cívky je vhodné při situacích změny taveniny, jako například přidání nového materiálu či jeho lití z kelímku. Podporuje rovněž větší elektrodynamické míchání ve vyšších částech taveniny. [24]



Obr. 2.3.2 Rozdíly geometrie induktoru na válcovém kelímku [24]

Další možnou verzí může být vytvoření nejednotné geometrie pece. S takto navinutou cívkou a nesymetrickým kelímkem lze ovlivnit nejen magnetické pole vytvořené cívkou, ale i míchání taveniny a přestup tepla samotnou konstrukcí kelímku.



Obr. 2.3.3 Kuželovité a lineární symetrické provedení induktoru [24]

2.4 Komora

Ochranná komora při konstrukci studeného kelímku zajišťuje ochrannou atmosféru uvnitř pece. Toto je důležité především u tavení reaktivních materiálů, jakým je kupříkladu titan, kdy komora bývá vyplněna nereaktivním plynem například argonem, či bývá atmosféra odčerpána a v komoře je vytvořeno vakuum.

V případě tavení oxidů není inertní atmosféra žádoucí, naopak se komora využívá pro řízenou oxidaci vsázky v kelímku. Do komory je tedy umožněn vstup kyslíku a zároveň jsou odsávány výpary z taveniny. [11]

Avšak další důležitou funkcí je stínění samotné cívky studeného kelímku či ochrana proti úniku taveného materiálu. [23]

Komora bývá obvykle tvořena dvojitými listy nerezové oceli s vhodně umístěným sklem a otvory pro doplňování taveniny. Další důležité vybavení ochranné komory je filtrační zařízení schopné odfiltrovat výpary taveniny. [23]

Mezi těmito listy v případě nutnosti proudí chladicí voda pro odvod tepla ze stěny komory, a to pomocí samostatného chladicího okruhu.



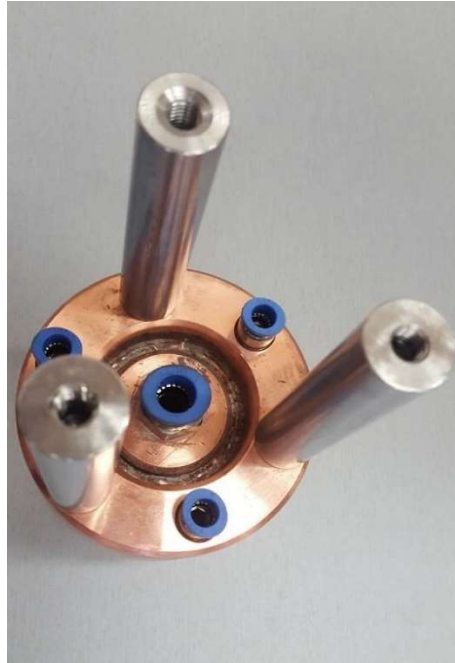
Obr. 2.4.1 Část pecní ochranné komory s instalovaným induktorem pro tavení oxidů kovů [23]

2.5 Chladicí systém

Neméně důležitou součástí konstrukce je její chladicí systém. Voda zde proudí uvnitř jednotlivých segmentů jejich dutým středem a zároveň pod dnem kelímku a odvádí tak teplo od samotných segmentů. Toto aktivní chlazení následně zabraňuje destrukci pece vlivem tepelného namáhání z vysokých výkonů.

Samotná cirkulace vody je zajištěna instalovanými čerpadly. Podle náročnosti chlazení se volí řešení jedním čerpadlem rozděleným na několik okruhů pro méně náročné aplikace. V takovém případě jsou jednotlivé okruhy možné regulovat nezávisle.

Pro případy nutnosti většího chladicího výkonu je chlazení řešeno několika čerpadly, kdy pro kelímek i cívku je k dispozici separátní systém. Chlazení cívky a kelímku tedy neprobíhá ze stejného zdroje chladicí vody. Každý okruh má též vlastní cirkulační čerpadlo. [26]



Obr. 2.5.1 Dno kelímku s konektory pro připojení vodního chlazení [25]

Při vysokých výkonech bývá samotné chlazení segmentového kelímku rozděleno, kdy jeden chladicí okruh bývá veden dutými segmenty, zatímco dno kelímku bývá řešeno separátním chladícím okruhem.

Vzhledem k vysokým výkonům je však v aplikaci tavení kovů ve studeném kelímku nutno chladit nejen cívku a segmentový kelímeček, avšak i další namáhané součásti.

Mezi další chlazená zařízení patří samotná komora, kde chladicí voda proudí mezi její dvojitou stěnou. Silně namáhanými zařízeními s vodním chlazením jsou taktéž IGBT tranzistory napájecího generátoru pro nižší frekvence, pro výstupní proudy vyšších frekvencí generátor obsahuje mosfety či elektronky.

Vodu je však nutno také chladit, standardní způsob spočívá v instalaci tepelného výměníku. Tento výměník následně může tvořit hliníkový žebrovaný pasiv s ventilátorovým ofukem zajišťující lepší odvod tepla. Dalším možným způsobem jsou velké nádrže vody, kde může při nižším průtoku dojít k samovolnému ochlazení. [23]



Obr. 2.5.2 Chladicí systém včetně čerpadel [26]

2.6 Vysokofrekvenční generátor

Velmi důležitým komponentem každé pece je napájecí jednotka, jakou je vysokofrekvenční generátor. Tyto generátory převádějí vstupní 50Hz frekvenci sítě na vysokofrekvenční výstup pro napájení pecní cívky.



Obr. 2.6.1 Vysokofrekvenční generátor [23]

Pro nižší frekvence na tavení reaktivních kovů jsou na generátory o frekvenci jednotek kHz využity IGBT tranzistory. Zatímco pro frekvence desítek kHz jsou využity mosfety pro frekvence nad 300kHz triody. [23]

3. Tavení ve studeném kelímku

Existují zde dvě rozdílné metody tavení ve studeném kelímku. Při jedné z nich je materiál chlazen přímým stykem s kovem. Při druhé metodě sám materiál vytváří krustu tzv. „skull“ který poté tvoří mezistupeň mezi taveným materiálem a chlazenými segmenty. [2]

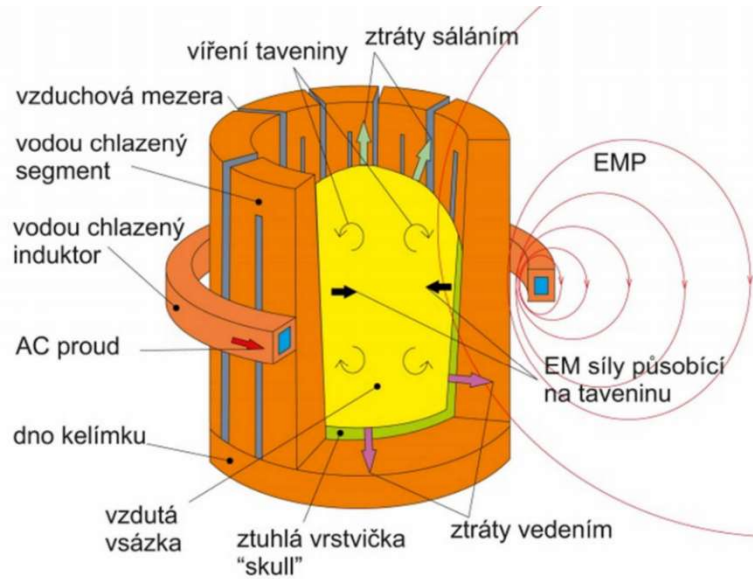
Díky víření taveniny jsou tyto tavené materiály chemicky homogenní v celém objemu vsázky. Materiály tavené ve studeném kelímku jsou obvykle oxidy kovů, skla či reaktivní kovy jako kupříkladu titan.

3.1 Tavení elektricky vodivých materiálů

Tavení extrémně reaktivních materiálů v konvenčních metodách s keramickými kelímky vede při vysokých teplotách ke kontaminaci materiálu. Proto pokud chceme tavit materiál, jakým je například titan, tantal či molybden, je nutné použít aplikací tavení ve studeném kelímku. Tavenina zde není vystavená účinku vyzdívky kelímku, avšak je zde v kontaktu s kovem. Kontakt zde není přímý, při tavení reaktivních kovů dochází k vzniku velice tenké vrstvy ztuhlého materiálu. Avšak ta je oproti oxidům dobře elektricky vodivá i v tomto stavu.

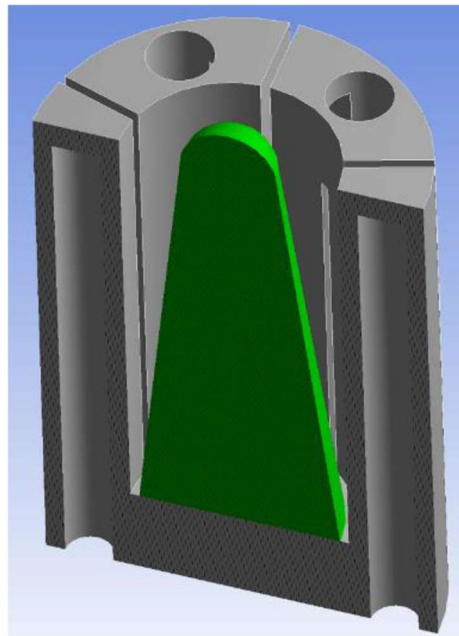
Vzhledem k přítomnosti kovového kelímku zde nedochází k vymývání kelímku a jeho mísení s taveninou. To nám umožňuje tyto reaktivní materiály tavit s vysokou čistotou vzhledem k tomu, že tento kov je chlazený vodou. [1,2,3]

Tavení elektricky vodivých materiálů se provádí v ochranné atmosféře. Výsledné produkty tak poté disponují vysokou čistotou a dobrými mechanickými vlastnostmi. Při tavně elektricky vodivých materiálů taktéž není nutno použít startovací fázi. Konstrukčně pak bývá kelímek v segmentovém provedení. [11]



Obr. 3.1.1 Schématické znázornění tavby při nižším víření [23]

Při počátku tavení se kov rychle zahřívá, přitom vyplňuje dno metalického kelímku a zároveň přichází do kontaktu s chlazenými segmenty. Když se materiál začíná tavit, elektromagnetická síla v taveném kovu způsobuje víření a vytváří tak homoli roztaveného materiálu.



Obr. 3.1.2 Plně vytvarovaná homole taveniny [25]

Tato homole se následně tvaruje do modelu, který přichází při správném víření do kontaktu pouze se dnem kelímku a okraji segmentů. Tento stav, který je při tavení

v kelímkových pecích nežádoucí vzhledem k vymývání kelímku, omezuje styk materiálu s chlazenými segmenty a snižuje tak ztráty prostřednictvím vodivého kontaktu. Tyto ztráty se následně omezují pouze na dno kelímku a malou část spodní části segmentů.

Nicméně i tak jsou tyto ztráty oproti tavení oxidů větší, protože zde je materiál elektricky vodivý již při běžné teplotě a ochlazení materiálu nevytváří izolační vrstvu mezi taveným materiálem a kelímkem samotným.

Oproti technologii tavení vakuovým elektrickým obloukem (VAR) zde však nedochází k přehřátí materiálu. [17]

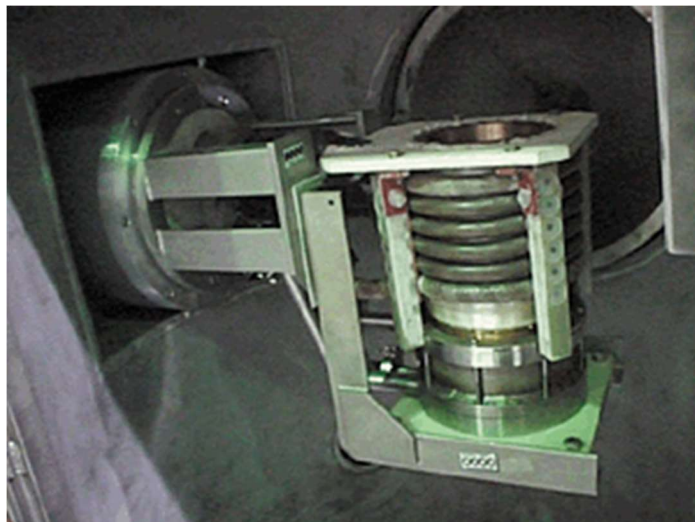
3.1.1 Titan

Častým zástupcem tavení ve studeném kelímku bývá titan a jeho slitiny, který je vhodně využíván v automobilovém či lékařském průmyslu, a to vzhledem k jeho poměru pevnosti k hmotnosti materiálu. Taktéž se vyznačuje velkou chemickou stálostí vůči kapalinám i plynům. [11,16]

Ačkoliv je titan 10. nejrozšířenější prvek na zemi, jeho širšímu využití brání jeho obtížnější zpracování. Titan je v přírodě přítomen ve formě s kyslíkem, např. TiO_2 . Běžné hutní metody zpracování jsou pro něj neúčinné. Proto se pro získání čisté formy titanu využívá hořčíku v inertní argonové atmosféře. [21]

Již čistý titan je poté při následném tavení ovlivněn několika faktory. [16,21]

- Reaktivní s kyslíkem, nutnost odlití i chlazení ve vakuu či inertní atmosféře.
- K odlití roztaveného titanu je nutné využít nereaktivních, žárupevných forem (zirkon, thorium a yttrium).
- Odlitý titan často vyžaduje přepracování a úpravu odlitků, vzhledem k obtížnému odlívání.
- Vzhledem k rychlému chladnutí materiálu nelze pec vypnout při odlévání.



Obr. 3.1.3 Studený kelímek pro tavení 10kg titanu v ochranné komoře [16]

Vzhledem k těmto problémům je vhodné tavit titan ve studeném kelímku při užití ochranné atmosféry. Hlavní výhodou tavení v tomto typu pece je tedy oproti kelímkové peci eliminace obsahu kyslíku, který by ovlivňoval materiál během tavby a následně by způsobil jeho větší křehkost. [11,16]

Při použití indukčního tavení lze díky víření taveniny k titanu taktéž snadněji přidávat materiál, a to přímo do taveniny, či jej legovat. Dále je možné udržet jeho tekutý stav po delší dobu, vzhledem k snížení vlivu oxidace. Udržení tavení po delší dobu zajistí roztavení i všech materiálů v titanu obsažených, jakými jsou žáruvzdorný wolfram či tantal. [16]

Ačkoliv obsah kyslíku v titanu způsobuje jeho křehkost, také zvyšuje jeho pevnost. Proto se při tavení ve studeném kelímku využívá řízení množství oxidu v tavenině. Toto se ovlivňuje přidáním oxidu titaničitého. Toto zajistí požadovaný obsah kyslíku v tavenině při každém lití materiálu. [16]

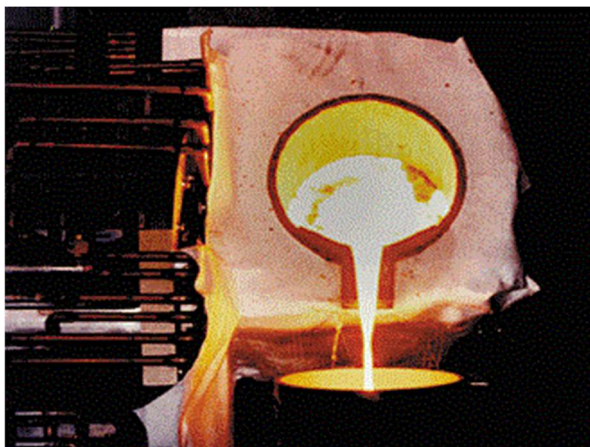
Jiné prvky, jako například uhlík zvyšují mechanickou pevnost, při koncentraci nad 0,1 % vzniká karbid titanu TiC. Obsah uhlíku v titanu se běžně udržuje okolo 0,01%. Vodík a křemík snižují titanu jeho houževnatost, jeho přítomnost je však zanedbatelná, a to s pouze 0,01%. [21]

I když je titan při tavení vysoce reaktivní, již roztavený titan je vůči korozi odolný, a to díky tenké povrchové vrstvě na vyrobeném odlitku. Tato vrstva způsobuje větší odolnost nejen vůči korozi, ale i proti kyselinám či solím. Rovněž je titan tvořen vysoce tvrdými částicemi. [21]

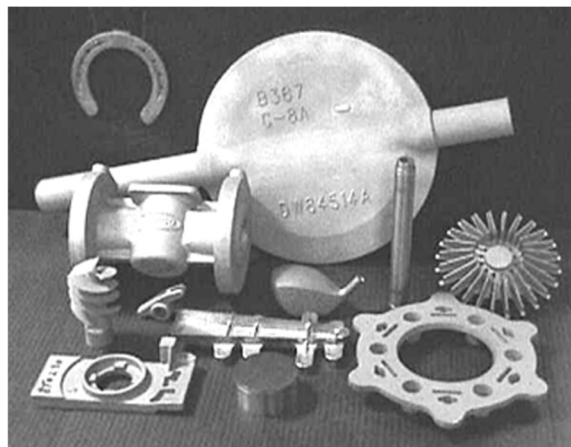
Čistý titan se vyznačuje vysokým poměrem mezi pevností a hustotou v porovnání s ostatními kovy. Je též značně mechanicky odolný a společně s velkou tepelnou kapacitou i teplotně odolný.

Titan jako čistý prvek má však kromě odolnosti a chemické stálosti i několik nevýhod. Jednou z nich je horší obrobiteľnosť, než je běžná u ostatních kovů. Vlivem kyslíku je jeho povrch tvrdý a křehký, to může při obrábění povrch poškodit. [21]

Samotný titan taktéž nemá příliš dobrou tepelnou vodivost, oproti oceli je pouze čtvrtinová. Jeho vlastnosti lze však zlepšit použitím titanu ve slitinách.



Obr. 3.1.4 Lití roztaveného materiálu do formy [16]



Obr. 3.1.5 Titanové odlitky [16]

3.1.2 Titanové slitiny

Vzhledem k dobré možnosti legování je při tavení titanu ve studeném kelímku časté přidávání jiného prvku do taveniny. [16,18]

Titanové slitiny se dělí do skupin na α , β a $\alpha+\beta$. Každá z těchto skupin má své specifické vlastnosti, které upravují vlastnosti titanu pro různé aplikace.

α slitiny jsou obvykle slitiny titanu s hliníkem či cínem, tyto prvky způsobují větší odolnost proti tečení, jsou tak vhodné pro vysokoteplotní aplikace. Při nižší koncentraci těchto prvků jsou slitiny tažné i houževnaté i při kryogenních teplotách, to je činí vhodnou volbou pro kryogenní aplikace. [28]

Oproti jiným slitinám disponují horší kujností, ne však tak velkou odolností proti korozi. Na rozdíl od jiných slitin nelze vylepšit jejich vlastnosti tepelným opracováním

vzhledem k stabilitě struktury těchto slitin. [28]

β slitiny jsou tvořeny pomocí vanadu, niobu či molybdenu. V případě molybdenu dochází k posílení odolnosti proti korozi. Slitiny obecně mají dobrou kujnost v širokém rozmezí teplot. Slitiny také disponují dobrou houževnatostí, prokalitelností a obrobitelností. [28]

Tyto slitiny jsou tedy vhodné k tepelnému opracování jako žíhání či kalení. Využit je lze do pružin či upínacích prvků a vzhledem k lomové houževnatosti i do vesmírných konstrukcí.

$\alpha+\beta$ slitiny jsou tvořeny z kombinací příměsí α i β . Vlastnosti těchto slitin následně záleží na poměru α a β prvků ve slitině. Nejběžnější slitina této skupiny a slitin titanu obecně je Ti-6Al-4V.

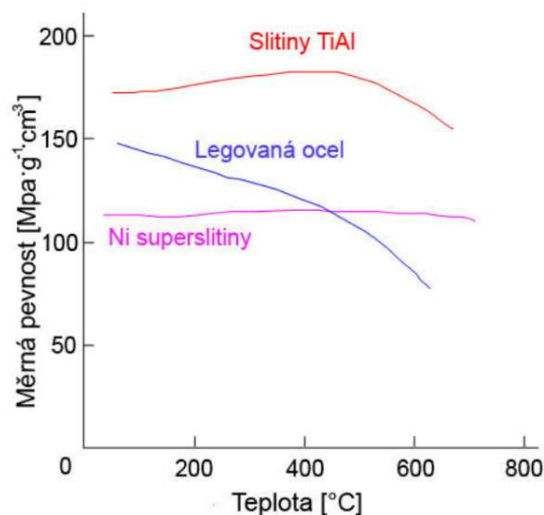
3.1.3 Slitiny Titanu a Hliníku

Slitiny TiAl se vyznačují vysokou pevností v tahu, oproti ostatním slitinám má nízkou tažnost, a to okolo 1 % při nižších teplotách. Kdy s přibývajícím obsahem hliníku se zhoršují vlastnosti slitiny s ohledem k tváření za tepla. [19]

Implementace hliníku zajišťuje větší odolnost titanu na přítomnost vodíku a nedochází k menšímu poklesu houževnatosti materiálu. Rovněž má významný vliv na zlepšení tvrdosti materiálu.

TiAl slitiny disponují větší pevností materiálu oproti legovaným ocelím. Jak je z grafu níže patrné, tento rozdíl měrné pevnosti se s rostoucí teplotou ještě zvyšuje. Toto lze ocenit například při aplikacích, kde je nutno dodržet co nejnižší hmotnost.

Nejčastějším představitelem titanových slitin je Ti6Al4V, tvoří 70 % všech vyrobených titanových slitin. Důvod využití této slitiny je její nízká měrná hustota, abrazivní odolnost a mez v kluzu. Tato slitina tavitelná při teplotě 999°C je použitelná do teploty 400°C. Hustota této slitiny je 4,42kg/dm³ při pevnosti v tahu 900MPa. [21]

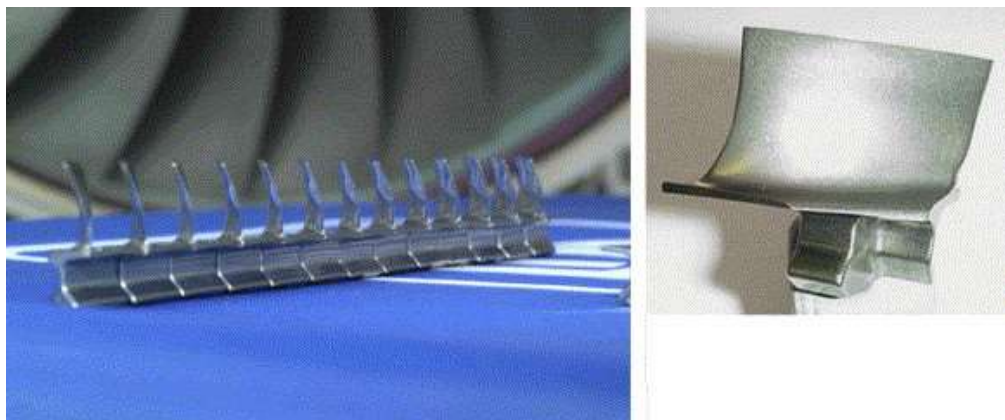


Obr. 3.1.6 Porovnání pevnosti slitiny TiAl s ocelí [20]

Ti6Al4V tak dosahuje větší pevnosti v tahu než čistý titan, ten disponuje pevností v tahu 240MPa, tato slitina tak dosahuje pevnosti téměř čtyřnásobné. Velmi pozitivní vliv má obsah hliníku i na pevnost v kluzu, kdy oproti pevnosti titanu 170MPa je dosaženo 870MPa.

Obsah hliníku se v těchto slitinách udržuje do hodnoty 7%, větší hodnota by vedla společně ke stoupající pevnosti i k velké křehkosti materiálu a tím i obtížnější tvárnosti materiálu.

Tato slitina hliníku převyšuje pevností i ostatní slitiny titanu. Slitiny TiAl jsou tedy vhodné pro aplikace se silným namáháním a vysokoteplotním aplikacím. Pro konstrukční aplikace však bývá problém jejich nízká tažnost. Možností využití pro tyto slitiny mohou být například lopatky kompresorů (obr. 3.1.7) či součástky proudových motorů. Další uplatnění nacházejí v lékařství či automobilovém průmyslu.



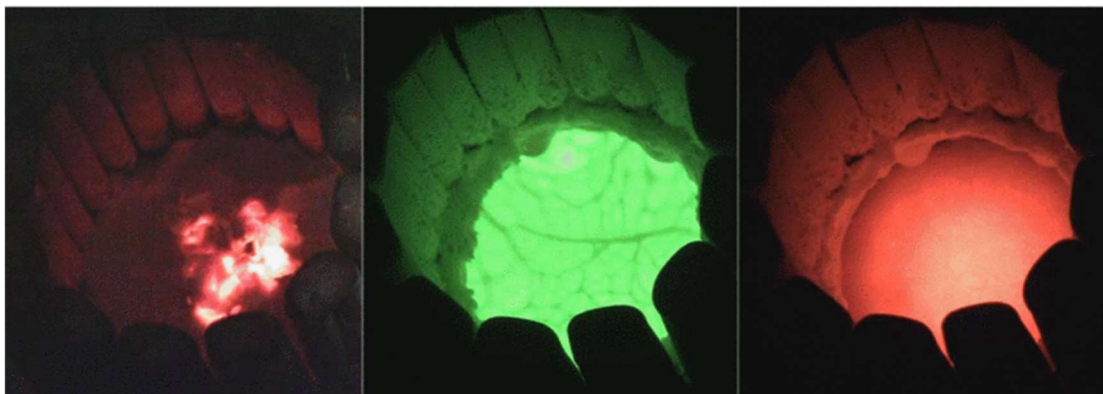
Obr. 3.1.7 Části kompresoru z materiálu TiAlNb [19]

3.2 Tavení elektricky nevodivých materiálů

Tavení materiálu se špatnou elektrickou vodivostí je u studeného kelímku časté. Na rozdíl od tavení kovů je třeba tento materiál nejprve připravit pomocí tzv. startovací fáze. Tato metoda spočívá v přidání materiálu elektricky vodivého již při nízkých teplotách. Poté lze přidat materiál, který se prohřeje od toho již nataveného materiálu, a tak spustí “řetězovou reakci“, následně se poté roztaví téměř celá vsázka. [2,10]

Je však nutné vzít v potaz i možnost kontaminace materiálu. Proto je vhodné použít ke startovací fázi materiál, který je obsažen i v taveném oxidu. Proto pokud tavíme oxid materiálu jako Al_2O_3 je vhodné pro startovací fázi použít hliník v metalické formě. [2]

Pokud není možné přidat materiál, který je už v tavené slitině obsažen, je vhodné přidat jiný materiál, avšak v co nejmenším množství. Proto se při tavně YBCO používá při startovací fázi grafitový kroužek. Tento kroužek je po překonání startovací fáze odstraněn. Problém nastává v případě ochranné atmosféry či vakua uvnitř pece. [2]



Obr. 3.2.1 Průběh tavení – startovací fáze, roztavená vsázka, chlazení [14]

Třetí možnost provedení startovací fáze spočívá v přidání dalšího zdroje, kterým je část materiálu natavena tak, aby mohla tavba pokračovat samostatně. K tomu by bylo možné použít laseru či elektrického oblouku. [2]

Po dokončení startovací fáze je nutné i během tavby zajistit určitou rovnováhu. Při tavení oxidů se nepoužívá kompletní tavba. U krajů kelímku, kde je vsázka chlazená, se uchovává vrstva nenataveného materiálu. Nenatavená vrstva materiálu snižuje odvod tepla kelímkem a tím značně zvyšuje účinnost tavby. Takto vytvořená vrstva se nazývá skull.

Toto snížení odvodu tepla umožňuje nízká tepelná vodivost oxidů pevném stavu. Ta

je oproti tepelné vodivosti roztavených oxidů značně nižší. Odvedené teplo skullem je proto mnohem nižší, než kdyby došlo ke kompletnímu protavení materiálu.

Tento skul taktéž zabraňuje kontaktu s kelímkem a chrání jej tím od poškození. Pro získání této vrstvy je nutno kelímek značně chladit a odvádět tak teplo a přebytečný výkon od stěn kelímku.[2]

3.3 Zpracování roztaveného materiálu

3.3.1 Lití kovů

Po roztavení materiálu je nutné vsázku odstranit. V případě tavení reaktivních kovů je nutné vsázku z kelímku odlít v tekuté formě. Proto je nutno tavený materiál ohřát na vyšší teplotu, než je teplota tavení, aby nedošlo k příliš rychlému ztuhnutí. Pro TiAl je doporučený přesah teplot 100 °C a více.

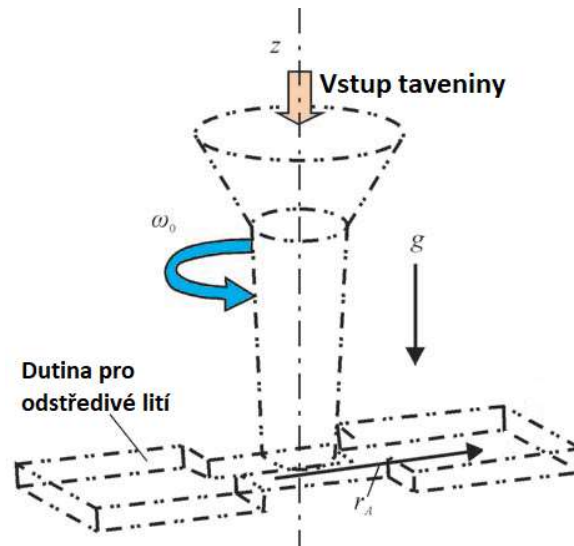
Pokud chceme získat materiál v roztavené formě před chladnutím, je nutné umístit celé tavící soustrojí na otočný mechanismus a odlít materiál do připravené formy.

Licí formy připravené uvnitř ochranné atmosféry pece se podobají formám na odlití železných výrobků. Hlavní rozdíl spočívá v materiálu licí formy, kdy formy pro lití ocele vyrobené ze zirkonu či siliky nelze použít vzhledem k vysoké oxidaci a pórovitosti materiálu. [16]

Pro lití reaktivního titanu se využívají žáruvzdorné materiály, které nepodporují oxidaci materiálu jako například zirkony, thoria a yttria. Dalším rozdílem je zde nutnost kontrolovat obsah popela v tavenině. Větší obsah popela by způsoboval větší tuhost roztaveného materiálu a tím i jeho obtížnější lití. [16]

I správně nataveným materiálem bez nežádoucích příměsí je lití titanu obtížné vzhledem k nízké tekutosti roztaveného materiálu. Bez správné úpravy licí formy to vede k nesprávnému plnění formy, či vlivem smrštění k tvorbě plynných částí. [16]

Kromě úpravy materiálu formy je nutné tuto formu vyhřívat, aby nedošlo k nežádoucímu rychlému ztuhnutí před vyplněním formy.



Obr. 3.3.1 Schéma odstředivého lití taveniny [27]

K zabránění toho efektu se k odlévání využívají odstředivé síly, které zajistí správné vyplnění formy. Tyto odstředivé síly působící z centra lící formy, vyplní všechny tenké části odlitku a zajistí tak rovnoměrné vyplnění celé formy a tím i výrobu kvalitního odlitku s plným detailem formy po vychladnutí.

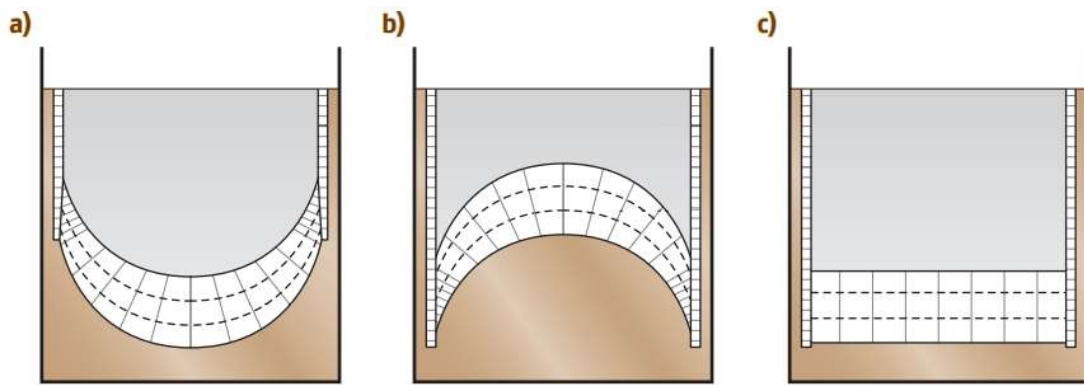
Centrifuga udržuje odstředivou sílu, dokud nedojde k plnému ztuhnutí titanu. Pro udržení této síly je však nutné, aby měla forma symetrický tvar s radiálním vyvážením podél prstence. [17]

3.3.2 Chlazení a krystalizace oxidů

V případě prvků, jako tavených oxidů, není přímé odlití do formy žádoucí. V tomto případě je u rovnoměrně roztaveného materiálu nutno tento materiál opět zchladit, aby došlo ke krystalizaci.

K tomuto lze využít regulaci toku vody uvnitř segmentů studeného kelímku, jeho vhodným řízením lze umožnit odvod tepla z taveného materiálu a zajistit tak jeho plné ztuhnutí uvnitř kelímku. [14]

Správným chlazením tak dosáhneme krystalizace materiálu. V principu dojde ke snížení výkonu pece. Přesněji ke snížení přenášeného výkonu do vsázky. [22]



Obr. 3.3.2 Směr růstu krystalů při metodě přímé krystalizace konvexní (a), konkávní (b) a vodorovný (c) [22]

Snížení výkonu cívky lze dosáhnout pomocí metody přímé směrové krystalizace. Při této metodě je kelímek postupně sunut dolů a tím separován od vlivu pecní cívky. Při dostatečném snížení výkonu poté v materiálu nastává proces krystalizace. Kdy její směr ovlivňuje tepelnou vodivost a teplota taveniny. [22]

4. Numerický model

Pro numerický návrh modelů studeného kelímku lze dnes s výhodou využít výpočetní techniky s programem umožňujícím analýzu elektromagnetických a teplotních polí.

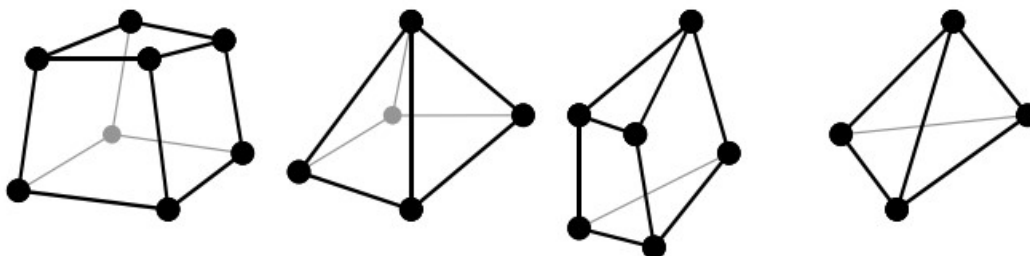
V případě tvorby numerického 3D modelu byl využit program ANSYS Electronics. Tento program pomocí řešení metodou konečných prvků umožňuje výpočet elektromagnetických polí a společně s doplňkem Icepack napojení elektromagnetického řešení na tvorbu teplotních polí.

Pro tento systém řešení byla pro zjednodušení výpočtu uvažována slabě sdružená úloha, s ohledem na využitou slitinu Ti-6Al-4V je relativní permeabilita rovna jedné. Nemůže tak ohřevem dojít k její znatelné změně. V případě elektrické a tepelné vodivosti ke změnám dojde, ne však k tak velkým, jakou by způsobila ztráta magnetických vlastností. Pro výpočet by tedy bylo vhodné zvolit velikost parametrů odpovídající střední hodnotě součtu jejich hodnot pro jednotlivé teploty.

Pro řešení numerického modelu využívá ANSYS metodu konečných prvků.

4.1 Metoda konečných prvků

Tato metoda spočívá v rozdělení řešené oblasti na konečný počet podoblastí tzv. prvků. K tomu je nutné na modelu tělesa vytvořit síť konečných prvků. Každý tento prvek má kromě dimenze a tvaru i polohu svých uzlů. Tyto uzly společně s prvky tvoří síť, ve které následně hledáme parametry řešení. Některé veličiny jsou tak počítány z prvků a jiné z uzlů. [32]



Obr. 4.1.1 Prvky metody konečných prvků [32]

Hustota a topologie těchto prvků sítě následně ovlivňuje kvalitu výsledků

a potřebnou výpočetní kapacitu pro řešení.

Na rozdíl od analytických metod metoda konečných prvků neposkytuje závislost mezi vstupními a výstupními veličinami v nekonečně mnoho bodech. Výsledek metody je tak výsledná hodnota parametru v konečném počtu uzlů. [32]

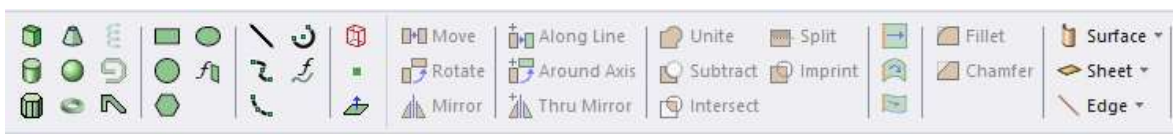
Nicméně hlavní výhodou tohoto procesu je možnost řešit problémy složitějších těles, než by umožnila analytická metoda, jejíž využití končí u elementárních, pravidelných těles. [32]

Největším omezením metody konečných prvků tak bývá dostupný výpočetní výkon, jeho časová náročnost a též nutnost výpočet opakovat při změně nějakého z parametrů.

4.2 Návrh modelu

4.2.1 Geometrický návrh

ANSYS Electronics ve vlastním prostředí modelu umožňuje interaktivní tvorbu jednoduchých 2D a 3D modelů. Jejich vhodnou úpravou a prolínáním lze dosáhnout komplexního modelu. Takto vytvořený model lze kdykoliv během návrhu upravovat bez nutnosti dalších změn systému řešení, to umožňuje značnou výhodu pro případ postupných úprav. Program umožňuje taktéž import již hotového 3D modelu importovaného z jiných konstrukčních programů, jeho využití je však limitované vzhledem ke značnému omezení jeho úprav.



Obr. 4.2.1 Panel pro tvorbu modelu ANSYS Electronics

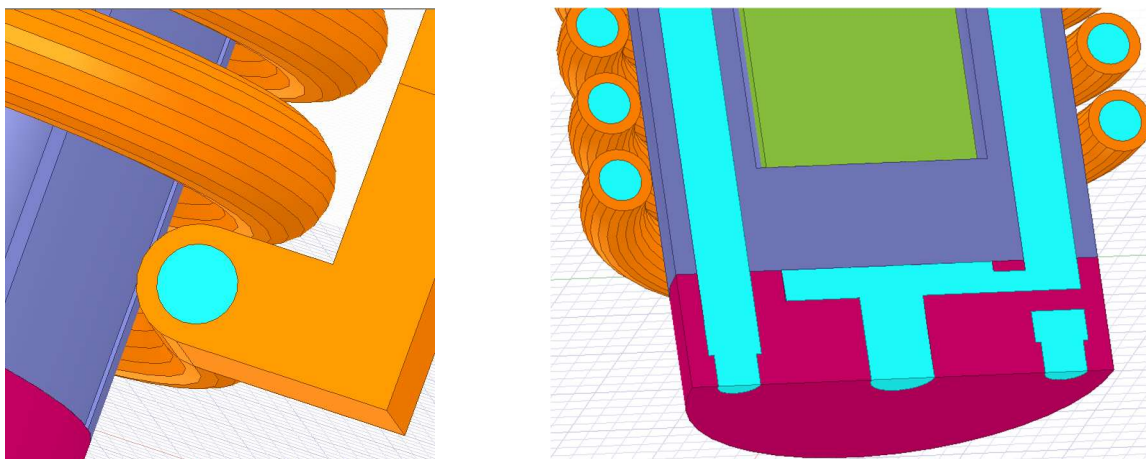
Při definování modelu je nutno vzít v úvahu jeho zjednodušení. Odstranění částí, jejichž zanedbáním nedochází k významnému ovlivnění systému, umožňuje zmenšení počtu prvků při následné tvorbě meshe.

rozměr	velikost	jednotky
h	27,5	mm
R ₂	10	mm
r ₃	11	mm
R ₃	20	mm
h _{dno}	10	mm
h _{wall}	50	mm
r _{chlad}	5	mm
n _{seg}	5	–
r ₁	3	mm
r ₁₁	2	mm
n _{coil}	6	–

Tab. 2: Výběr parametrů řešeného modelu ingotu

Řešený model je tak navrhnut jako šesti závitová měděná cívka navinutá okolo měděného kelímku s pěti segmenty. Cívka je vinuta z trubkového vodiče a segmentový kelímek má uvnitř každého ze segmentů vrtaný kanál umožňující jeho chlazení.

Chlazení cívky je definováno jako kanál vedoucí v radiálním směru okolo kelímku v ose vodiče napájecí cívky. Přívod je ve spodní části cívky a odtok na jejím konci ve vrchní části.

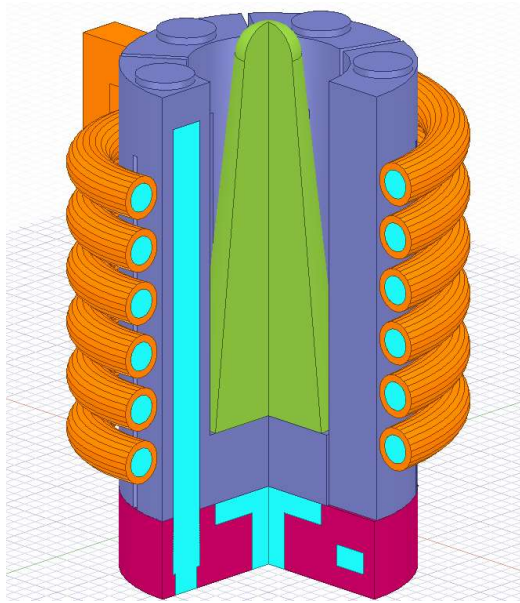


Obr. 4.2.2 Chlazení modelu studeného kelímku vstup cívky (vlevo), řez chlazením pece (vpravo)

Chlazení segmentového kelímku spočívá v připojení kolektoru ke spodní části kelímku. Systém zde má jeden přívod a dva odtoky, přičemž jako první je chladicí voda středovým konektorem přivedena ke dnu kelímku, kde je vlivem kontaktu kelímku s taveninou koncentrováno nejvíce tepla. Tato voda následně proudí do jednotlivých segmentů, z kterých je opět vedena do kolektoru a následně odvedena ze systému dvěma

bočními konektory.

Model je vytvořen ve dvou variantách, kdy první z nich reprezentuje plná válcová vsázka ve tvaru vloženého ingotu. V tomto stavu dochází k rychlým změnám teploty. Ty jsou v následném výpočtu řešeny až do roztavení a vytvarování homole vzhledem k elektrodynamickému víření. Druhou variací je postupně tvarující se homole, která se vlivem elektrodynamického víření postupně formuje do modelu podobnému tvaru jehlanu. Druhý model se skládá z několika verzí, které reprezentují postupné formování homole.



Obr. 4.2.3 Model studeného kelímku s vytvarovanou homolí (7. verze)

Pro případ postupně se tvořící homole bylo definováno 7 verzí. Při každé byl uvažován postupný přesun hmoty taveniny vlivem elektrodynamického víření a s tím se zvyšující výška hladiny taveniny. Model homole je definován jako komolý kužel s polovinou koule umístěné na vrchu komolého kužele. Parametr h_{h1} definuje výšku komolého kužele a r_{h1} je poloměrem vrchní plochy komolého jehlanu a rovněž i poloměrem polokoule.

$$V = \pi * h * R_2^2 = \pi * 27,5 * 10^2 = 8639,4 \text{ mm}^3$$

$$h = \frac{V - \frac{4}{3} * \pi * r_2^3}{\frac{\pi}{3} * (R_2^2 + R_2 * r_2 + r_2^2)} = \frac{8639,4 - \frac{4}{3} * \pi * 9^3}{\frac{\pi}{3} * (10^2 + 10 * 9 + 9^2)} = 19,7 \text{ mm}$$

r_{h1}	9	mm	h_{h1}	19,7	mm
r_{h2}	8	mm	h_{h2}	25,4	mm
r_{h3}	7	mm	h_{h3}	31,4	mm
r_{h4}	6	mm	h_{h4}	37,7	mm
r_{h5}	5	mm	h_{h5}	44,3	mm
r_{h6}	4,5	mm	h_{h6}	47,7	mm
r_{h7}	4	mm	h_{h7}	51,2	mm

Tab. 3: Výběr parametrů řešeného modelu ingotu

4.2.2 Parametry modelu

Po provedení návrhu je nutno definovat parametry modelu. Před samotným výpočtem je důležité nadefinovat materiály jednotlivých dílů. Sám ANSYS má již vlastní databázi některých prvků. Materiály již obsažené v databázi programu již mají předdefinované materiálové parametry, které jsou s ohledem na výpočet nezbytné.

V případě mého řešení je cívka i segmentový kelímek tvořen z mědi, zatímco v případě vsázky je aplikována slitina Ti-6Al-4V. Tato titanová slitina byla zvolena vzhledem k častému zastoupení mezi TiAl slitinami.

Model je řešen jako slabě sdružená úloha a materiálové vlastnosti jsou tak při výpočtu konstantní. Proto bylo nutné zvolit jejich vhodnou velikost tak, aby byl výsledek co nejbližší výpočtu s proměnnými materiálovými konstantami. Vzhledem k dostupnosti materiálových vlastností pouze pro omezený teplotní rozsah. Tento rozsah nepokrývá celou teplotní oblast až do roztavení materiálu, byly zvoleny hodnoty odpovídající 870°C. Tato teplota odpovídá přibližně polovině teploty tání slitiny Ti-6Al-4V a současně se překrývá s dostupnými materiály.

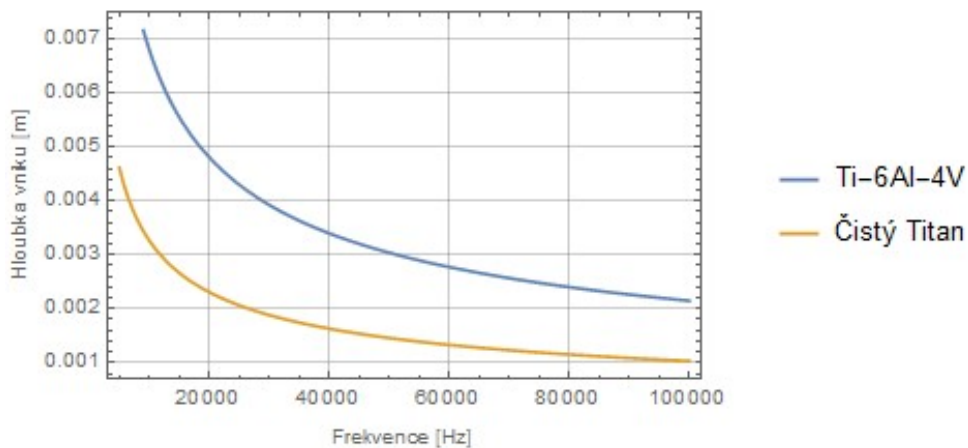
T	870	°C
γ	548546	S/m
λ	17,9	W/m*K
c_p	930	J/(kg*K)
ρ	4430	kg/m ³
μ_r	1,00005	–

Tab. 4: Výběr parametrů řešeného modelu ingotu [34,35,36]

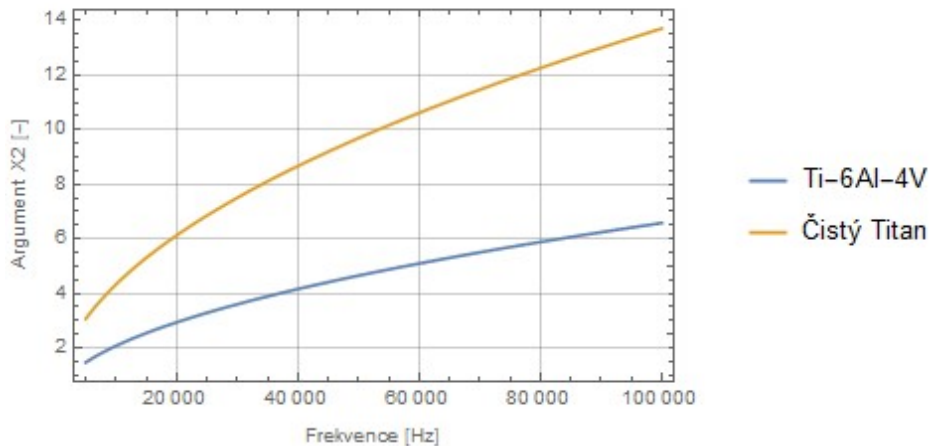
S ohledem na vnik elektromagnetického pole je taktéž nutné vytvořit parametr napájecího proudu a jeho frekvence. Kdy parametr proudu ovlivní velikost proudové hustoty vsázky a frekvence hloubku naindukovaných proudů. Parametr proudu byl zvolen ve snaze

zajistit rychlejší roztavení, tak aby nedocházelo k velkým teplotním ztrátám, vlivem postupného odvodu tepla dnem. Model je tedy navržen s proudem cívky, který je roven 380A.

Parametr frekvence je následně volen s ohledem na materiálové vlastnosti a velikost argumentu x_2 . Výpočet v programu Wolfram Mathematica znázorňuje závislost frekvence na velikosti hloubky vniku a argumentu.



Obr. 4.2.4 Porovnání závislosti frekvence na hloubce vniku pro čistý titan a slitinu Ti-6Al-4V



Obr. 4.2.5 Závislost argumentu x_2 na frekvenci pro čistý titan a slitinu Ti-6Al-4V

Při definici řešení teplotního pole bylo nutné navázat řešení v Icepaku na výsledky elektromagnetického modelu, to umožňuje implementaci elektromagnetických ztrát do modelu pracujícího s teplotními poli.

Chlazení titanové vsázky v případě studeného kelímku pro tavení kovů je zajištěno

především kontaktem se dnem kelímku vzhledem k elektrodynamickému víření. To zapříčiní, že je v modelu chlazení definováno odvodem tepla dnem kelímku. Samotné chlazení je tak řešeno přívodem vody přes konektor připevněný ke dnu segmentového kelímku (obr. 4.2.2).

Přívod vody k cívce i segmentovému kelímku je definován jejich plochou, kdy pro kelímek je kanál s poloměrem 3 mm a pro cívku 2mm. K oběma z nich je voda přiváděna proudem o rychlosti 10 m/s a na druhé straně je definován volný průchod vody.

4.2.3 Způsoby řešení

Využití řešení v programu v elektrické části programu ANSYS je možné definovat jako elektrické a magnetické. Vzhledem k řešení vzniku indukovaného tepla ve vsázce je systém řešení definován jako magnetický s ohledem na vznik vířivých proudů.

Řešení tepelné části pro případ ohřevu plně válcové vsázky je realizováno systémem transientního řešení umožňujícím získ výsledků postupného ohřevu dle nadefinované časové osy.

Pro získ postupného ohřevu je časový krok simulace nastaven po 10 sekundových intervalech, až do roztavení první části vsázky.

S ohledem na komplikovanost řešení bylo zanedbáno materiálové víření při tvarování homole. Modelování homole je řešeno s ohledem na získ elektrodynamických sil řešení v Maxwellu. Rovněž zvolený software v současné době neumožňuje tuto simulaci víření.

4.2.4 Mesh

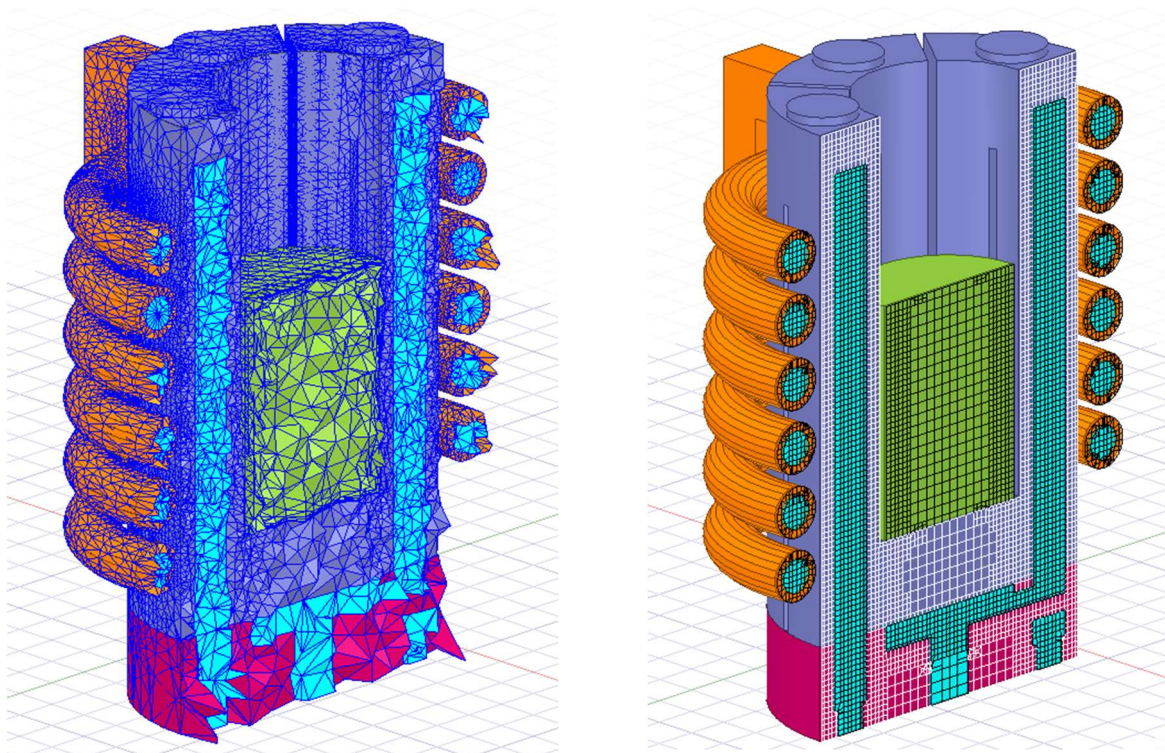
Tvorba prvky tvořeného 3D modelu, neboli meshe, je důležitou částí ANSYS výpočtu. Při aplikaci menších prvků dochází k přesnějším výpočtům. Současně však dochází k vyšší náročnosti výpočtu, v krajních případech až k nemožnosti řešení na daném zařízení vzhledem k nárokům na výpočetní výkon.

Proto je vhodné nadefinovat model tak, aby nebyla velikost prvků přehnaně malá. Současně však je nutné zajistit výsledky s co nejmenším zkreslením vzhledem k nastavení výpočtu. Vhodné je tak využít nastavení jemnějších prvků sítě v místě okrajů řešených objektů.

V modelu výpočtu elektromagnetismu je tedy nadefinováno zjemnění meshe vsázky na šestnásobek hloubky vniku, aby bylo dosaženo přesnějšího výsledku při minimálním zvýšení komplexnosti meshe.

Pro Maxwell je zde definovaný systém maximální rozlohy ploch jednotlivých prvků pro induktor a segmentový kelímek. Pro vsázku je definován systém tvorby meshe dle hloubky vniku, tento systém umožňuje zpřesnění meshe na krajích objektu s rostoucí velikostí prvků směrem ke středu objektu.

Systém meshe v Icepacku je, jak již bylo řečeno, definován pro celou oblast. Systém řešení poté zhušťuje prvky poblíž okrajů jednotlivých rozhraní modelu. Ačkoliv je tento systém unifikován, stále je nutné nastavit tvorbě meshe parametry jako například meze velikosti prvků a intenzitu zpřesnění na okrajích objektů.



Obr. 4.2.6 Mesh modelu ANSYS Maxwell (vlevo), Icepack (vpravo)

4.3 Zjednodušený výpočet

Plocha dna studeného kelímku je důležitá vzhledem k poměru množství vsázky ku ztrátám modelu studeného kelímku. Přičemž tyto ztráty jsou téměř výhradně realizovány dnem kelímku.

$$S_{dno} = \pi * R_2^2 = \pi * 1^2 = 3,142 \text{ cm}^2$$

Výška ingotu a z toho vycházející hmotnost je ovlivněna tvarem následně vytvářené homole, ta vystupuje vzhůru a vlivem silného elektrodynamického víření i za hranice vrcholu segmentového kelímku.

$$m = \rho * S_{dno} * h = 4430 * 3,142 * 10^{-4} * 3 * 10^{-2} = 0,0418 \text{ kg}$$

Teplota tavení slitiny Ti-6Al-4V je rovna 1660°C a společně s hodnotou měrné tepelné kapacity 930 J/mK určuje potřebnou energii pro ohřátí daného množství taveniny do bodu tání. Tuto potřebnou energii následně navyšuje odvod tepla dnem. Tyto materiálové vlastnosti jsou zvoleny dle Tab.4.

$$Q_{tav} = \Delta T * m * c_p = 1660 * 0,0418 * 930 = 59,085 \text{ kJ}$$

$$\Delta P_{dno} = q * S_{dno} = 5000 * 3,142 * 10^{-4} = 1570,8 \text{ W}$$

Pro návrh byla zvolena frekvence s ohledem na velikost argumentu x_2 rovno 6ti.

$$a = \frac{R_2 * \sqrt{2}}{x_2} = \frac{10 * \sqrt{2}}{6} = 2,357 \text{ mm}$$

$$f = \frac{1}{\pi * a^2 * \mu_0 * \mu_r * \gamma} = \frac{1}{\pi * (2,357 * 10^{-3})^2 * 4\pi * 10^{-7} * 1,00005 * 548539} \\ = 83114,7 \text{ Hz}$$

Tato frekvence je následně použita pro simulaci jako frekvence řešení a rovněž jako parametr pro zpřesnění meshe vsázky.

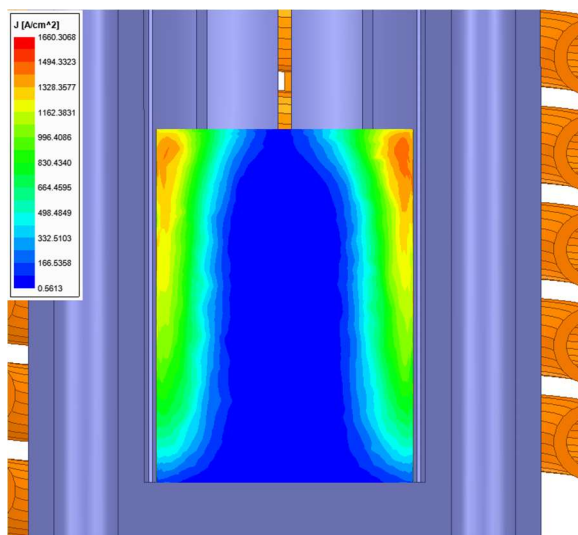
5. Simulace indukčního ohřevu

Následná simulace odpovídá navrženému modelu s vloženou vsázkou Ti-6Al-4V. V každém modelu bez ohledu na geometrický tvar či čas je tedy umístěn tento materiál jako vsázka.

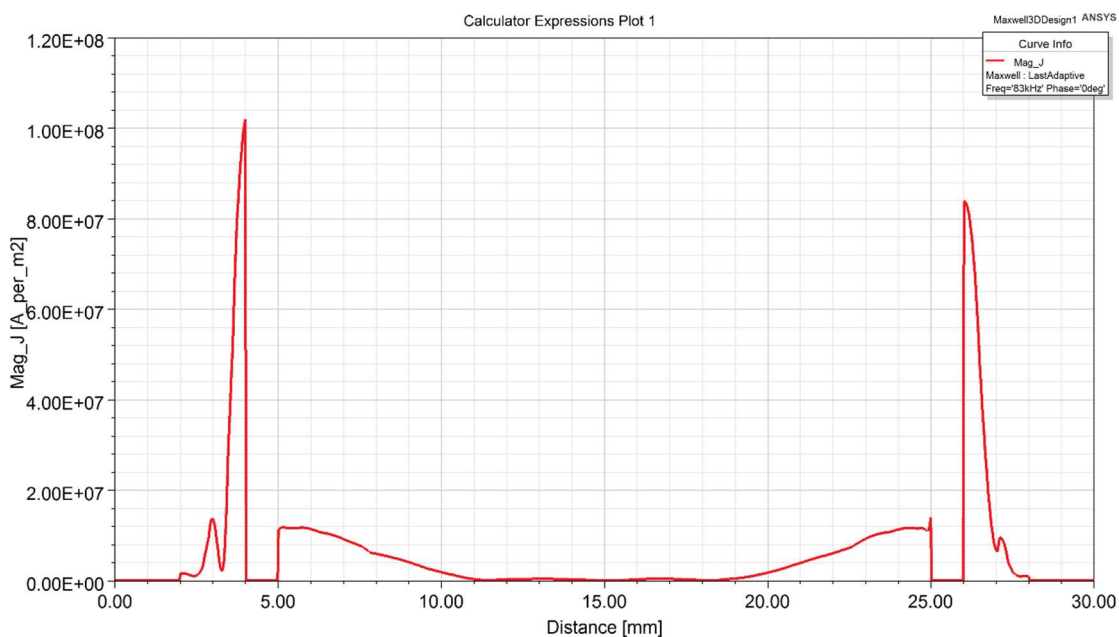
5.1 Elektrická simulace ingotu

5.1.1 Rozložení proudové hustoty

Vzhledem ke zvolené hodnotě frekvence a z toho plynoucí hodnotě argumentu je hodnota proudové hustoty vloženého ingotu soustředěna u kraje, a to obzvláště v horních částech. V postupující vzdálenosti směrem k ose vsázky je poté prudce zatlumena.

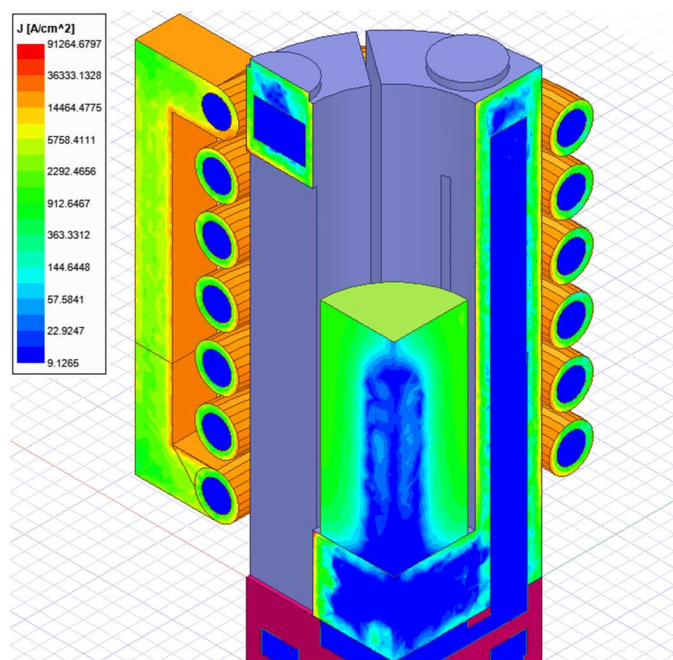


Obr. 5.1.1 Rozložení proudové hustoty v ingotu



Obr. 5.1.2 Proudová hustota ve vloženém ingotu a segmentovém kelímku

Graf výše (obr. 5.1.2) zobrazuje symetrické znázornění rozložení proudové hustoty, kdy středem grafu je osa ingotu. Hodnoty jsou zde vyneseny pro linku ve výšce 15cm nad podstavou válcové vsázky. Směrem od osy k povrchu ingotu dochází k růstu proudové hustoty. V uvažované mezeře mezi ingotem a kelímkem dochází ke skokovému pádu vzhledem k absenci materiálu. Samotný segmentový kelímek má na vnitřní straně násobně větší hodnotu proudové hustoty, ta rychle klesá až k nule, která u kraje grafu reprezentuje chladicí kanál daného segmentu.



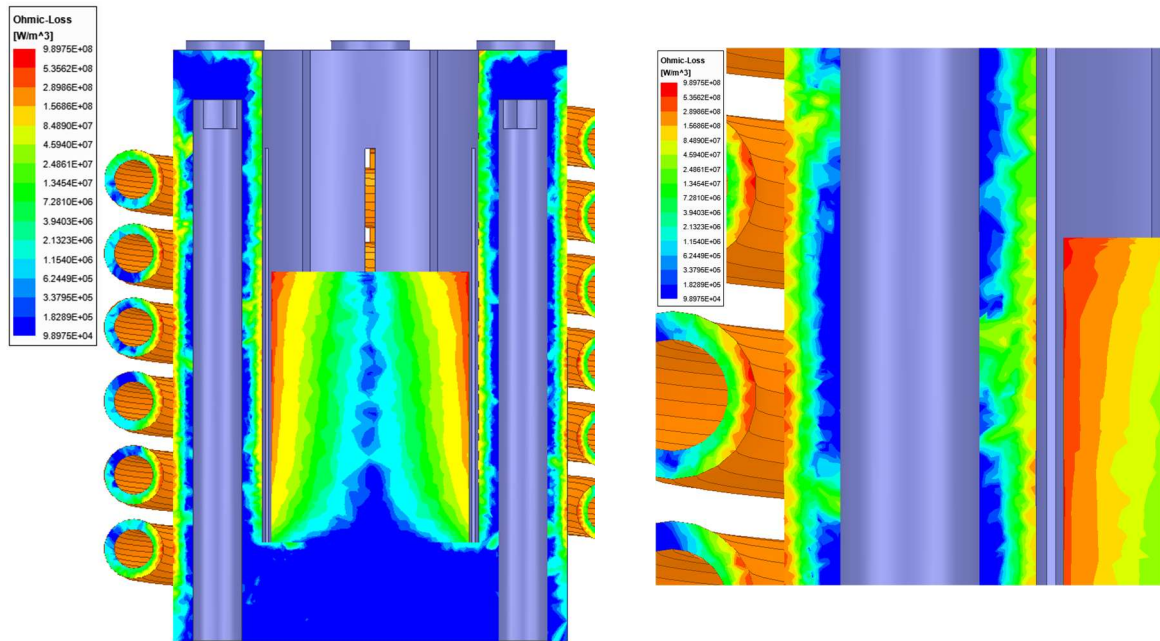
Obr. 5.1.3 Rozložení proudové hustoty v peci

5.1.2 Rozložení Jouleových ztrát

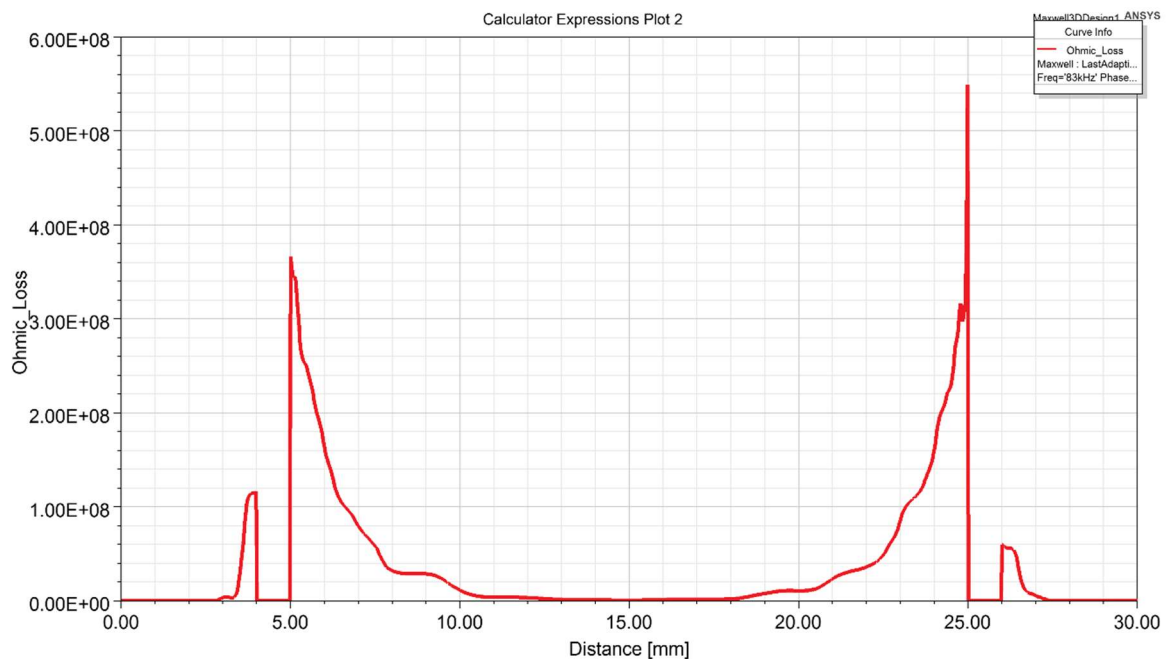
Jouleovy ztráty jsou rozloženy v celé peci, tyto ztráty vyvolávají následný vznik tepla. Ostatní typy ztrát jsou vzhledem k hodnotám Jouleových ztrát rozdílné o více než 10 řádů, proto je jejich vliv při tavení elektricky vodivých materiálů zanedbán.

Ztráty vznikají v celé peci, nejzřetelnější jsou však v samotném ingotu, a to zvláště u jeho povrchu. Nezanedbatelné jsou na malé oblasti na rozhraní cívky a kelímku, jejich plocha je však malá a vodní chlazení zajistí následný odvod vzniklého tepla z těchto částí.

Dle rozložení ztrát v ingotu lze následně odvodit i vznik teploty. Ta bude největší u horní části stěny válcové vsázky s postupně klesající hodnotou směrem ke středu vsázky.



Obr. 5.1.4 Jouleovy ztráty v celém studeném kelímku (vlevo), v detailu rozhraní (vpravo)

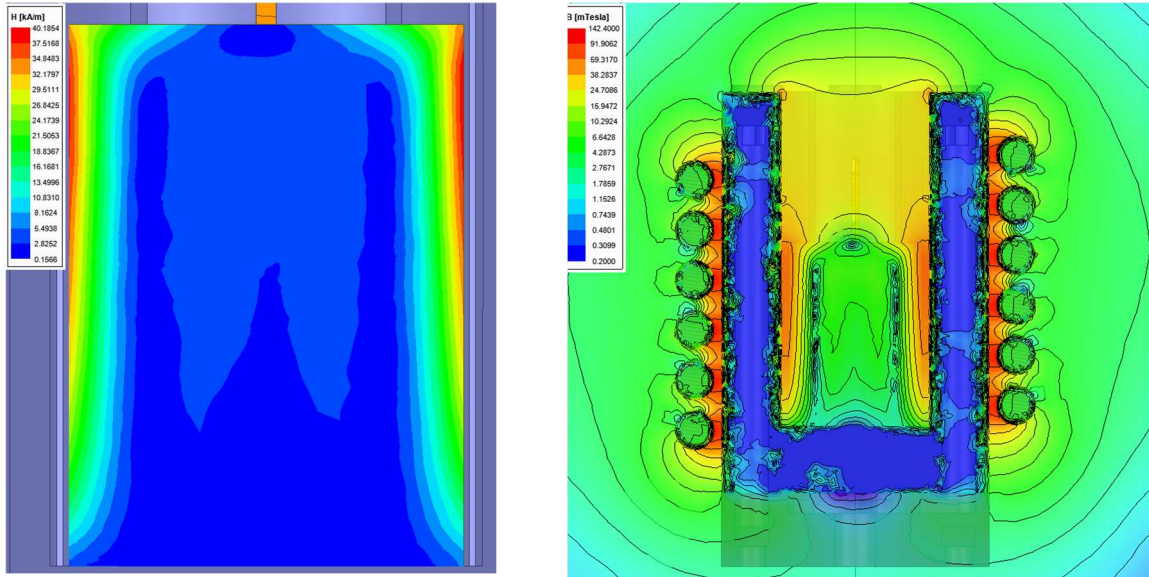


Obr. 5.1.5 Rozložení Jouleových ztrát v ingotu a segmentovém kelímku 15cm nad podstavou vsázky

5.1.3 Magnetická indukce a intenzita magnetického pole

Velikost magnetické indukce ve vsázce je vzhledem k použití neferomagnetických materiálů velikostně odlišná od intenzity magnetického pole pouze o konstantu permeability vakua. Indukce i intenzita je následně největší na rozmezí mezi cívkou a segmentovým kelímekem a taktéž na rozhraní kelímku se samotným ingotem. Vzhledem absenci blízkého

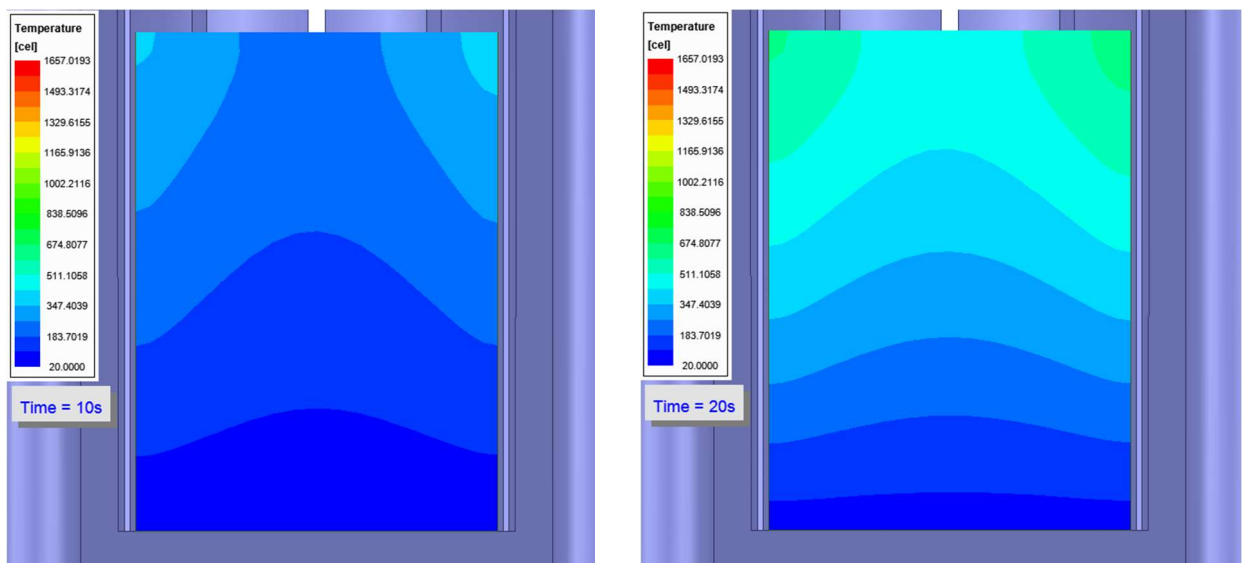
stínění je rozložení magnetické indukce patrné i v okolí pece. O odstínění vlivu elektromagnetického pole na okolní zařízení se stará ochranná komora, ta však není v numerické analýze uvažována.



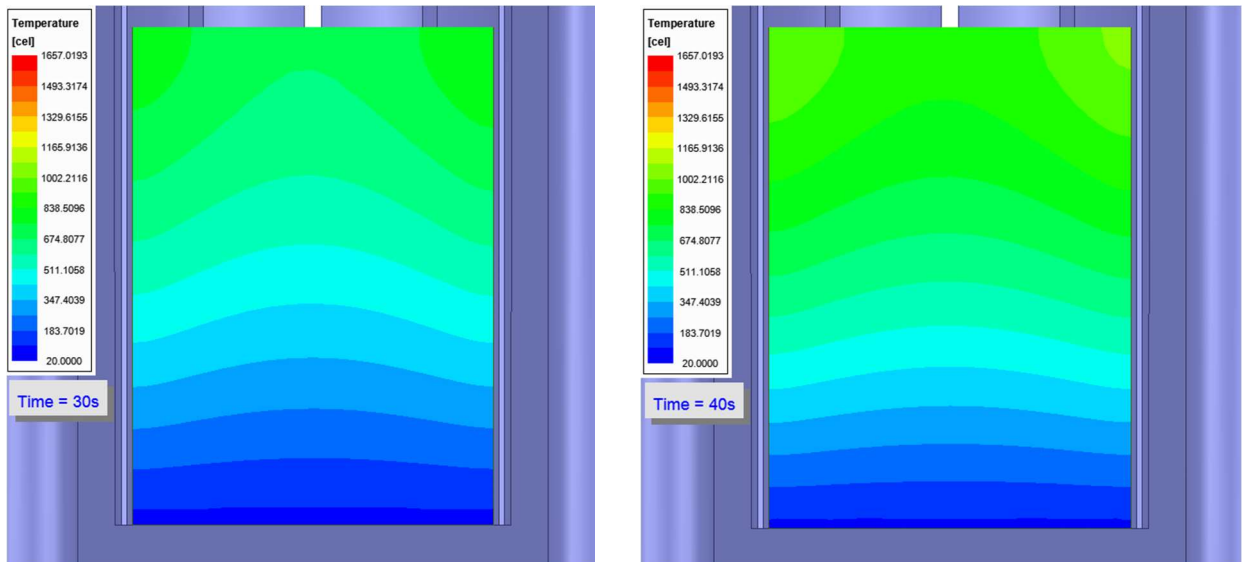
Obr. 5.1.7 Intenzita magnetického pole vsázky (vlevo), magnetická indukce v peci a okolí (vpravo)

5.2 Teplotní pole válcové vsázky

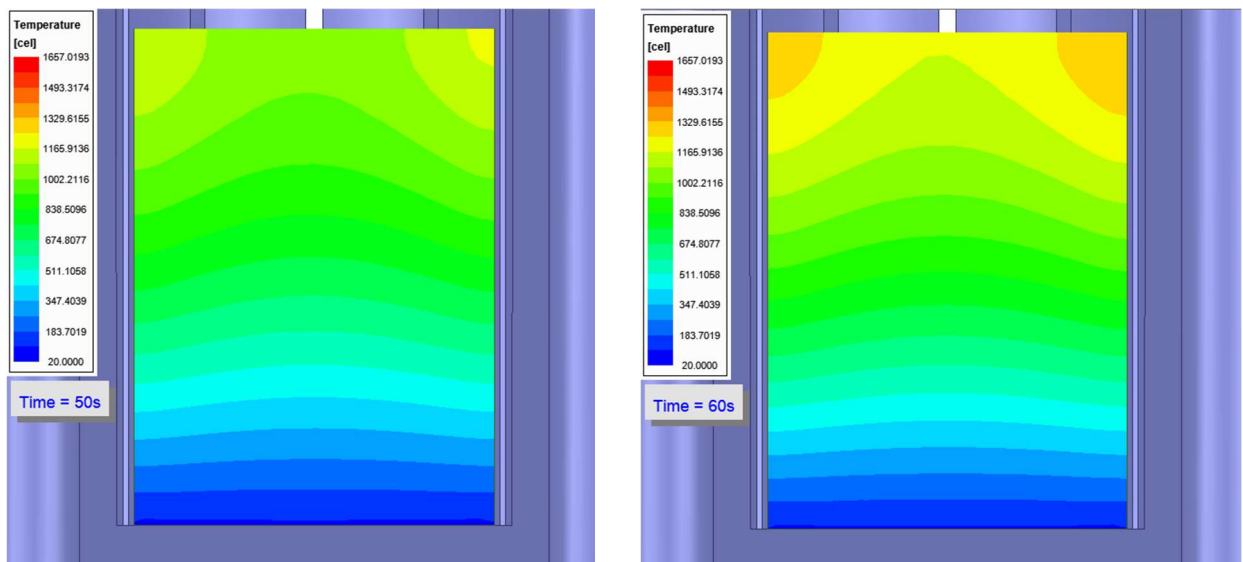
Teplotní pole počítá s Jouleovými ztrátami přenesenými z elektrické části výpočtu. Ke vzniku tepla proto dochází v celém studeném kelímku a nejvíce v samotném ingotu. O odvod tepla z kelímku a cívky se stará vodní chlazení, které zajišťuje teplotu kelímku i napájecí cívky dostatečně nízko (obr. 5.2.7).



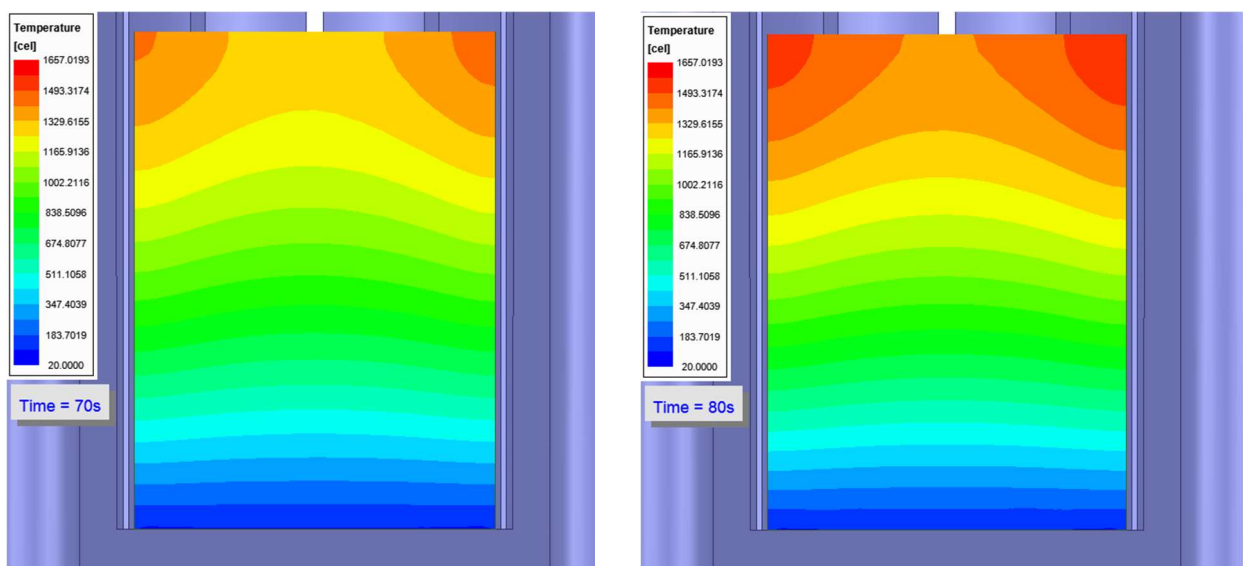
Obr. 5.2.1 Rozložení teplotního pole v ingotu při startu tavby 10s(vlevo), 20s(vpravo)



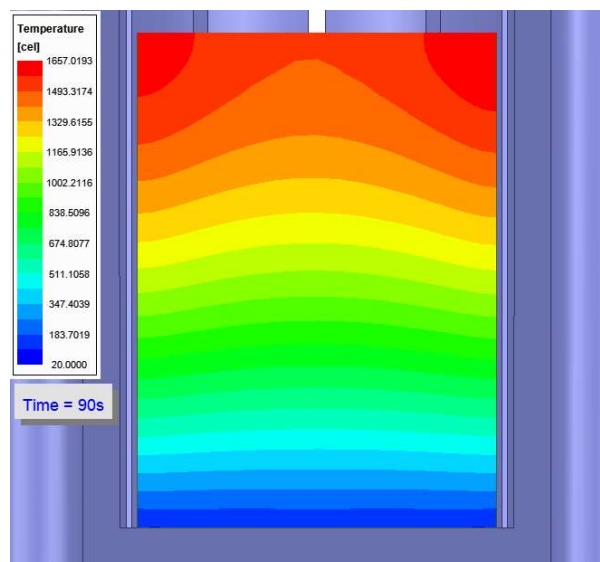
Obr. 5.2.2 Rozložení teplotního pole v ingotu při startu tavby 30s(vlevo), 40s(vpravo)



Obr. 5.2.3 Rozložení teplotního pole v ingotu při startu tavby 50s(vlevo), 60s(vpravo)



Obr. 5.2.4 Rozložení teplotního pole v ingotu při startu tavby 70s(vlevo), 80s(vpravo)



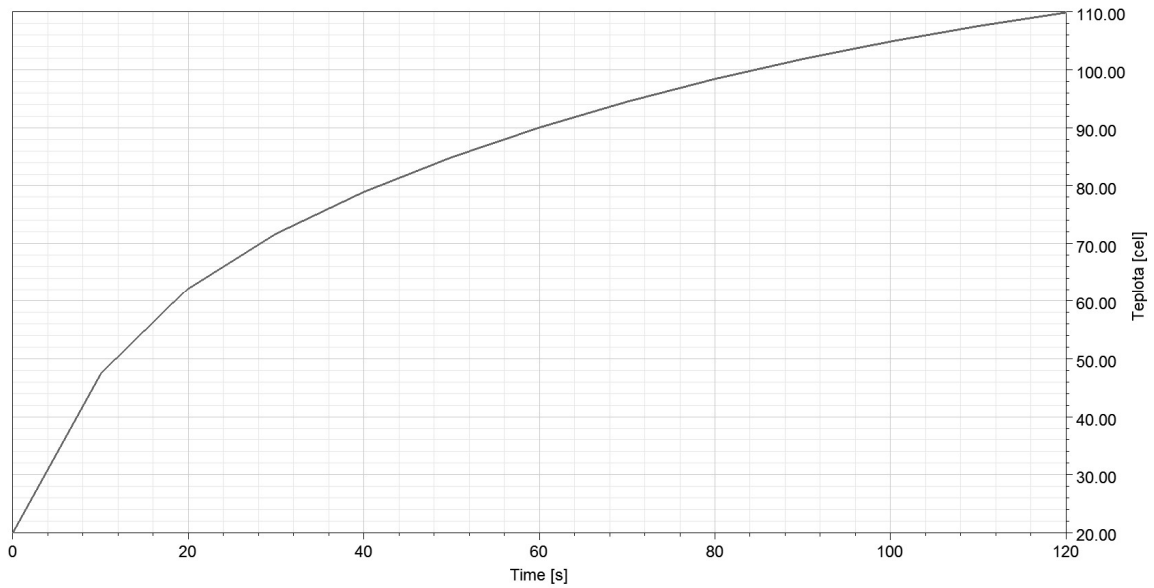
Obr. 5.2.5 Rozložení teplotního pole v ingotu při startu tavby 90s

Simulované podmínky ohřevu vycházejí z předpokladu 20°C jako výchozí teploty prostředí i modelů. Z počátku dochází k výraznému růstu teploty ve vsázce, který postupně zpomaluje vzhledem k přestupu teplot do okolních objektů.

Z výsledků ohřevu válcové vsázky je patrné, že ohřev vsázky je nejrychlejší u horních okrajů. Tato teplota se šíří směrem k chladnějším částem ingotu. Teplota vsázky postupně klesá s tím, jak se dostává do kontaktu s dnem chlazeného kelímku.

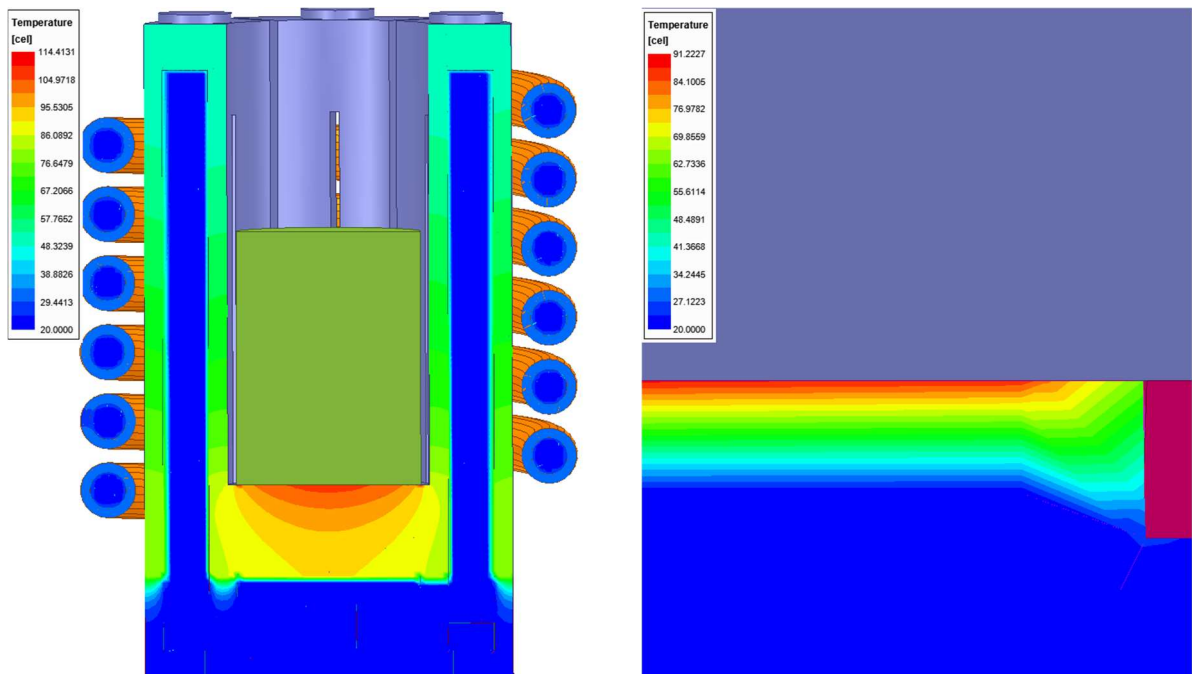
První roztavenou částí bude horní okraj oblasti válcové vsázky, k této změně dojde v peci při čase těsně přesahujícím 90 sekund. Teplota tání slitiny Ti-6Al-4V odpovídá 1660°C, to je velmi blízko teplotě dosažené po 90 sekundách tavby, ta je rovna 1657°C. Množství roztaveného materiálu by se v tomto případě zvyšovalo přibližně směrem odpovídajícím teplotním hladinám při 90s (obr. 5.2.5). Postup růstu teploty se zastaví ve chvíli vyvážení vzniku tepla elektromagnetickou indukcí a odvodu tepla dnem kelímku a sáláním do okolí neboli při tzv. ustáleném stavu.

Ve chvíli, kdy dojde k roztavení první části ingotu, je následná numerická simulace vzhledem k zanedbání víření taveniny nepřesná. Bez respektování víření taveniny nelze zjistit konkrétní rozložení teplot v roztavené vsázce. Toto víření však není předmětem zadání této práce. Po času roztavení toto víření zajišťuje přenos tepla v rámci ingotu nejen vedením jako u pevného ingotu, ale především prouděním, které je usměřováno a formováno elektromagnetickým polem.



Obr. 5.2.6 Křivka časového průběhu teploty a tepelného toku podstavou ingotu

Křivka teploty výše je v počátku prudce rostoucí, s postupem rostoucí teploty vzrůstá rozdíl teplot na rozhraní a s tím i vliv vodního chlazení. Vzhledem k nižší teplotě tání mědi, než zvolené slitiny musí být tento tepelný výkon musí být následně odveden, aby nedošlo k poškození segmentového kelímku.

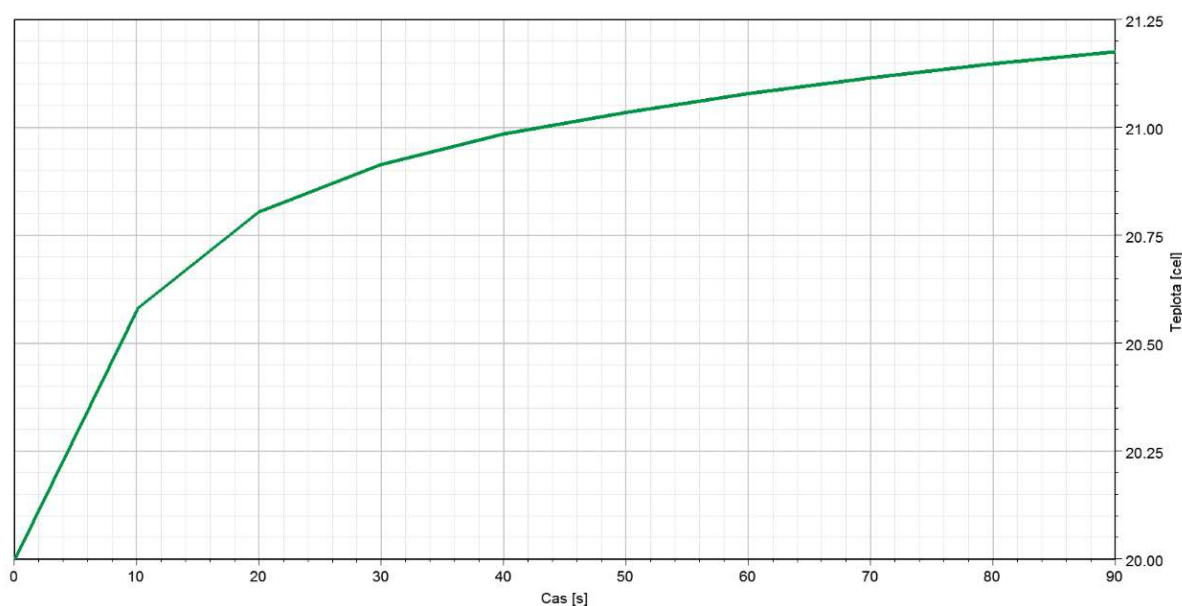


Obr. 5.2.7 Teplota pece bez uvažování vsázky (vlevo), detail vodního chlazení dna kelímku (vpravo) při 90s

Jak je znázorněno v levé části obr. 5.2.7, největší teploty dosahuje kelímek na

rozhraní styku s válcovou vsázkou, vzhledem k velkému přestupu tepla z ingotu je klíčová tepelná vodivost mědi, která zajišťuje odvod tepla k vodnímu chlazení. Toto vodní chlazení následně odvádí tepelnou energii mimo studený kelímek.

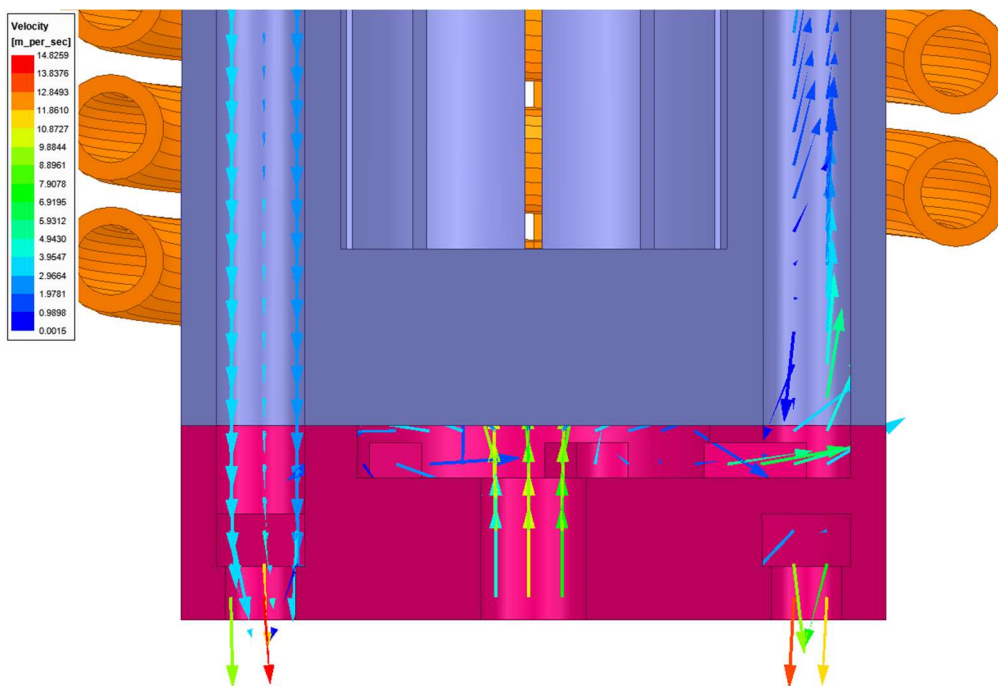
Chladicí kolektor připevněný ze spodu segmentového kelímku je navržen jen pro znázornění odvodu tepla chlazením. Pro reálný provoz pece je nutná jeho úprava, aby docházelo u dna k lepšímu odvodu vody. Jak je vidět, na rozhraní mezi kelímkem a vodním chlazením dochází k znatelnému růstu teploty vody (obr 5.2.7).



Obr. 5.2.8 Teplotní růst chladicí vody na výstupu z kolektoru

Odvedená teplota na výstupu chladicího vodního kanálu segmentového kelímku postupně roste, jak je však vidět, postupně se rychlost růstu výstupní teploty ustaluje a nedosáhne tak vysokého rozdílu oproti teplotě na vstupu vodního chlazení.

Pomocí kolektoru je proud chladicí vody přiváděn kolmo na dno segmentového kelímku a odtud následným odrazem putuje do pěti segmentů. Výstup z těchto pěti segmentů je následně spojen do kruhového kolektoru, tento kruhový kolektor následně vodu odvádí pomocí dvou výstupních kanálů. Výstupy jsou vůči ose pece symetrické, a tak je na obou výstupní tlak i teplota stejná.



Obr. 5.2.9 Proudění chladicí vody kolektorem a studeným kelímkem

5.3 Formování homole

Pro homoli bylo vytvořeno několik separátních simulací popisujících jednotlivé stavy při formování homole. Všechny tvary homole jsou počítány při konstantní frekvenci 83kHz stejně jako u plné válcové vsázky. S touto frekvencí je hloubka vniku poměrně malá a dochází tak k dobrému zatlumení i při zmenšení poloměru vsázky vlivem formování homole.

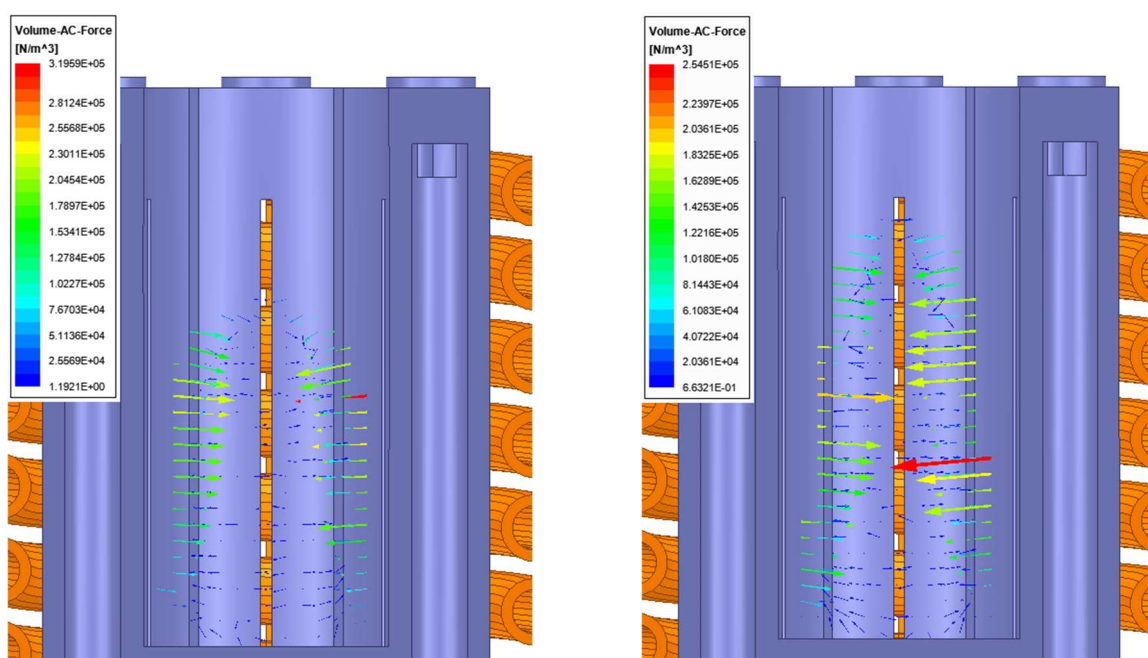
Typ vsázky	R [mΩ]	L [nH]	Z [mΩ]
válcová	29,02	409,76	215,65
homole I	26,73	419,31	220,3
homole II	26,12	422,78	222,02
homole III	26,1	422,79	222,02
homole IV	26,08	423,21	222,24
homole V	26,07	423,92	222,61
homole VI	25,77	426,07	223,69
homole VII	26,1	424,19	222,75

Tab. 5: Změna impedancí cívky v závislosti na tvaru vsázky

Tabulka výše ukazuje proměny impedancí cívky při změně geometrie vsázky. Jak je zřetelné z tabulky, s postupným růstem výšky vsázky dochází k poklesu odporu, současně

však dochází k růstu indukčnosti. Výsledná impedance je tak pomalu rostoucí, a to vzhledem k většímu vlivu změny indukčnosti. Tento postupný vývoj je obrácen až u 7. verze homole. V 7. verzi je následně změna parametrů opačná, dochází tedy k růstu odporu a poklesu indukčnosti. Toto by mohl způsobit tvar vsázky, která v 7. verzi dosahuje nad výšku segmentového kelímku a je tak ovlivňována přímo cívkou. Může však rovněž jít jen o numerickou chybu vzhledem k malé odchylce.

Výsledný tvar roztavené vsázky je dán působením elektromagnetické síly působící na ni. Vzhledem k tekuté vsázce tyto síly společně s rozdílem teplot způsobují přesun materiálu a tím i tvarování homole.

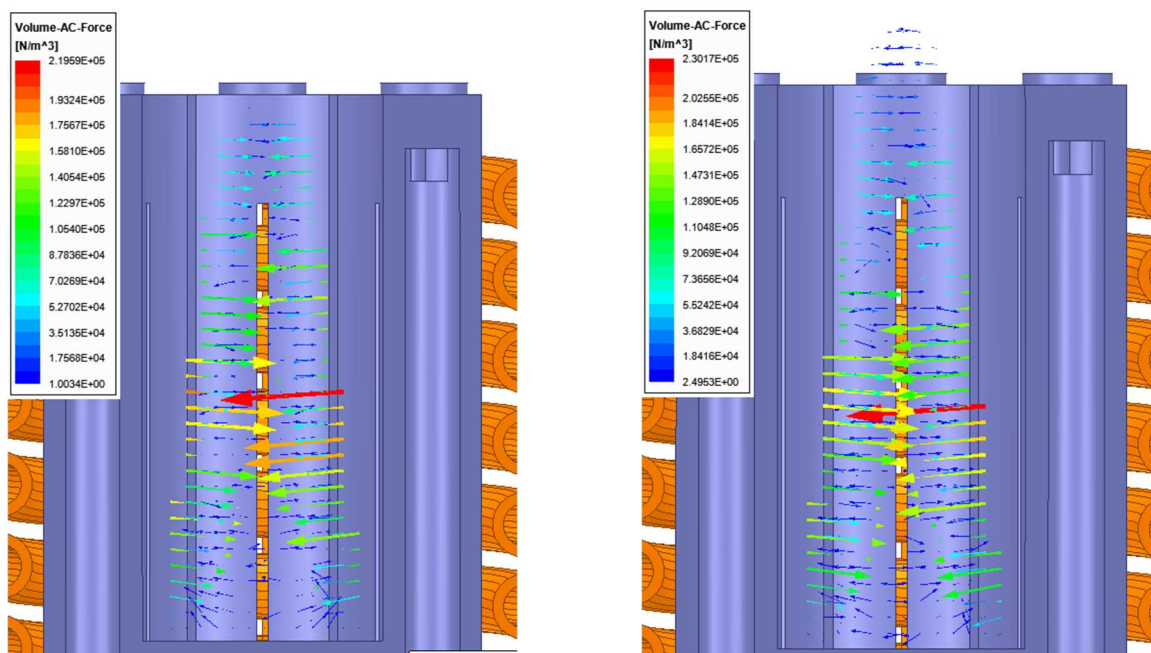


Obr. 5.3.1 Rozložení elektromagnetických sil ve vsázce pro 1. (vlevo), 3. (vpravo) verzi

V první verzi modelu je rozložení sil značně podobné silám uvnitř plné válcové vsázky. U plné válcové vsázky síly směřují ke středu ingotu s velikostí rostoucí společně s výškou v ingotu. Při první verzi homole jsou ve spodní části vsázky velikosti i směry působících sil velmi podobné, ve vyšších výškách společně s geometrickými změnami vsázky dochází k změně působících sil. Největší síly má tento model v rozhraní mezi komolým kuželem a polokoulí tvořící tuto vsázku, od této linie vzhůru poté síly postupně slábnou a působí směrem ke středu polokoule.

Při třetí verzi homole jsou již síly osově více nesymetrické. Největších elektrodynamických sil nabývá ingot ve střední výšce cívky. Od této hodnoty vzhůru

následně opět dochází k poklesu, v tomto případě oproti první verzi homole již směr sil působí více směrem k ose vsázky.



Obr. 5.3.2 Rozložení elektromagnetických sil ve vsázce pro 5. (vlevo), 7. (vpravo) verzi

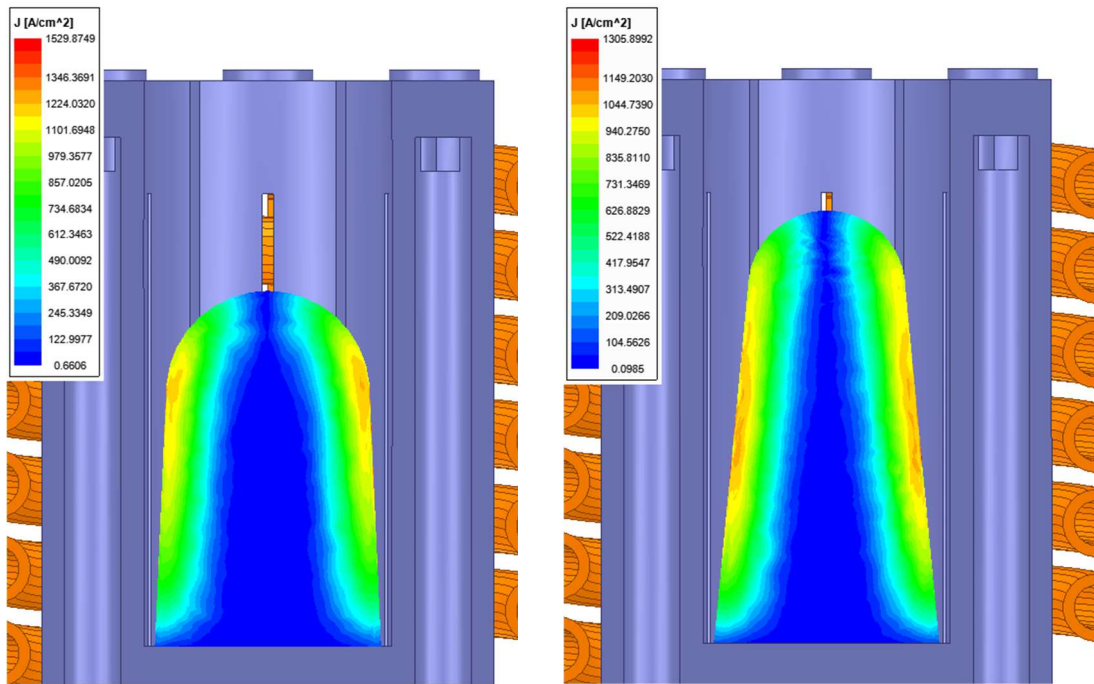
Pátá i sedmá verze jsou ve svém směru a velikosti sil značně podobné, k největším silám stále dochází ve střední výšce cívky. V horní části páté homole dochází k zeslabení sil o více než polovinu, až do úplného vrcholu však stále dosahují nezanedbatelných hodnot.

U poslední sedmé homole jsou síly na jejím vrcholu značně nižších hodnot, oproti hodnotám ve střední výšce homole dosahují pouze desetinových hodnot. Oproti směru vektorů sil v předchozích případech, síly v horní části homole směřují nejen k ose homole, ale částečně vzhůru. Tento směr je pravděpodobně způsoben geometrií cívky, kdy vsázka dosahuje nad výšku studeného kelímku a rovněž i nad cívku samotnou.

Vzhledem k zanedbání pohybu taveniny v tepelném výpočtu není znám přesný výsledný tvar homole při tavně. Vzhledem k výsledkům sil vytvořených ve vsázce bude pravděpodobný výsledný tvar blízký sedmé verzi homole, a to vzhledem k velkému útlumu sil v horní části vsázky. Pro ověření této skutečnosti je v další kapitole rozpracována verifikace.

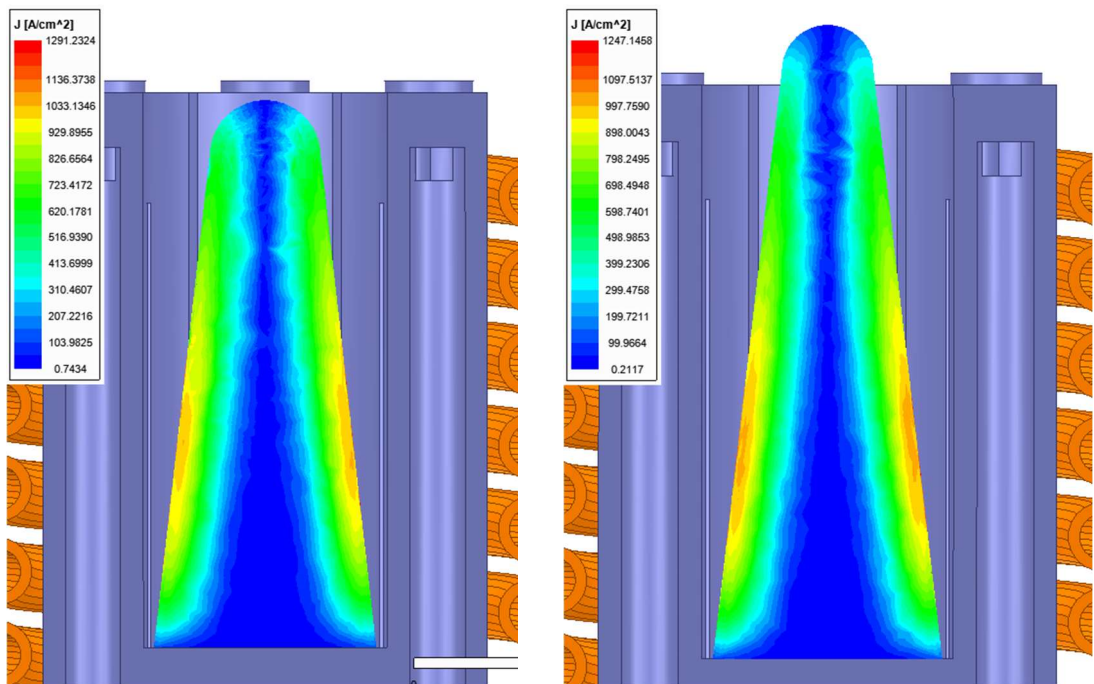
Pro tyto jednotlivé stavy formování homole nebude však rozdílný pouze stav sil uvnitř vsázky, ale změní se podle toho i ostatní parametry ve vsázce. Jedním z nich bude

i parametr proudové hustoty.



Obr. 5.3.3 Rozložení proudové hustoty ve vsázce 1. (vlevo), 3. (vpravo) verze

Velikost proudové hustoty svou velikostí v jednotlivých oblastech je rozložením velmi podobná rozprostření sil. S ohledem na parametr frekvence a s tím související velikosti argumentu x_2 , dochází k silnému zatlumení energie z cívky. I při zúžení poloměru vrchních částí homole oproti válcové vsázce nedochází k průžažnosti vsázky.



Obr. 5.3.4 Rozložení proudové hustoty ve vsázce 5. (vlevo), 7. (vpravo) verze

Pro verze 1. a 3. homole dochází k postupně zvětšujícímu se prostupu proudové hustoty ke středu společně s rostoucí výškou ve vsázce. Oproti tomu pro 5. a obzvláště 7. verzi je patrné, že k největšímu vzniku proudové hustoty dochází ve střední části homole a vrchní část vsázky má tak hodnotu proudové hustoty značně nižší.

Jak je patrné z výsledků ingotu (obr. 5.1.1 a 5.1.4), rozložení hladin Jouleových ztrát kopíruje rozložení proudové hustoty. Pro první verze vsázky bude k největšímu vniku tepla docházet na vrchních částech ingotu. S postupně se tvarující a zvyšující homolí v 7. verzi vsázky bude teplota vznikat především ve střední výšce vsázky, to je způsobeno pozicí induktoru a umístěním jeho středu. Toto teplo bude následně transportováno vířením do horních vrstev.

6. Verifikace výsledků

Pro verifikaci bylo využito dvou jednotlivých provedených taveb ve studeném kelímku. První z nich je navržena pro verifikaci elektrické části výpočtu. Druhý model je následně vytvořen pro ověření simulace teplotního pole.

6.1 Numerické ověření elektrické simulace

Proto pro verifikaci elektrického výpočtu bylo využito tavby slitiny pájky SnCu v kelímku CCI22, který odpovídá zde řešenému modelu.

Model byl navržen tak, aby odpovídal provedenému měření z tavby realizované 9.11.2017, kdy došlo k tavbě slitiny Sn97Cu3. Vzhledem k tomu, že zde došlo k roztavení materiálu, je možné s ohledem na zanedbání pohybu taveniny využít pouze elektrickou část výpočtu.

Návrh byl upraven tak, aby co nejvíce odpovídal vyrobenému exempláři. Kelímek a homole jsou tak totožné s případem 7. verze formování homole. U cívky došlo k zmenšení počtu závitů a k zmenšením rozstupů závitů mezi sebou. Také došlo k prodloužení přírodních vodičů, aby byly parametry co nejbližší.

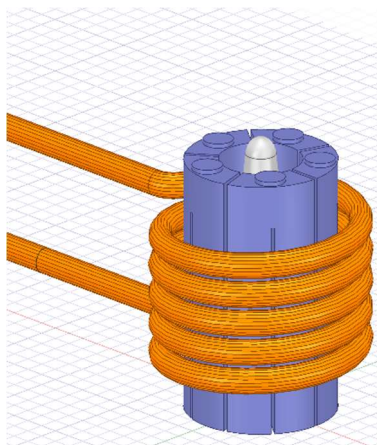
Parametry cívky	Velikost	Rozměry
poč. závitů	5	–
výška cívky	40	mm
délka přívodu	150	mm
poloměr vodiče	3	mm
poloměr chlazení	2	mm
poloměr cívky	26,2	mm

Tab. 6: Geometrie cívky CCI22 [25]

γ_{SnCu}	8,7	MS/m
$\mu_r \text{ SnCu}$	1	–
ρ_{SnCu}	7000	kg/m ³

Tab. 7: Materiálové vlastnosti Sn97Cu3 [39]

Dle měření je model nastaven na stejnou frekvenci napájecího proudu 13 kHz. Proud cívky je poté definován na 660 A.



Obr. 6.1.1 Model pro verifikaci tavby



Obr. 6.1.2 Vyrobený studený kelímek CCI22 [25]

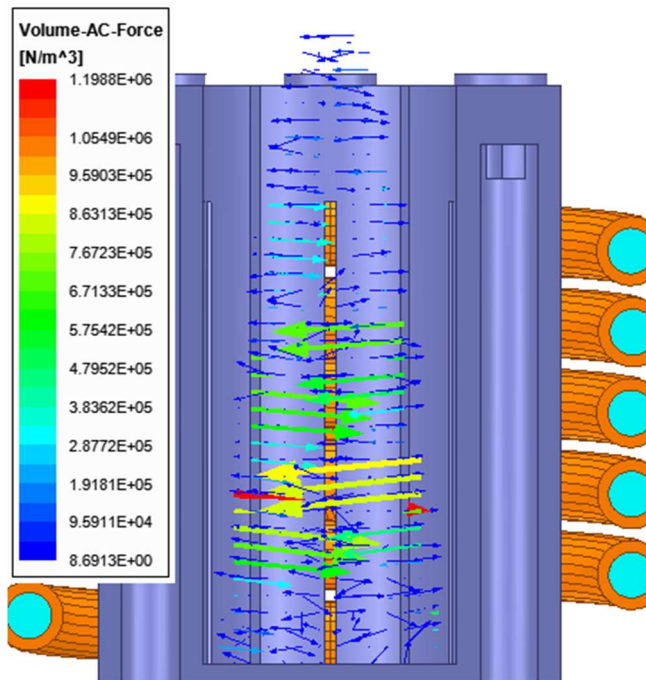
Pro kontrolu přiblížení parametrům měřeného modelu je využito porovnání parametrů cívky při vloženém segmentovém kelímku se vsázkou. Z tabulky níže je zřejmé, že změřené a vypočtené hodnoty jsou blízké ne však totožné. To je způsobeno některými konstrukčními změnami oproti simulované a vyrobené cívce a taktéž nejasností tvaru vsázky při provádění měření.

	R [mΩ]	L [nH]	Z [mΩ]
Simulace	6,2	763	62,6
Měření	5,9	750	62
Chyba	5,08%	1,73%	0,97%

Tab. 8: Parametry cívky CCI22 [25]

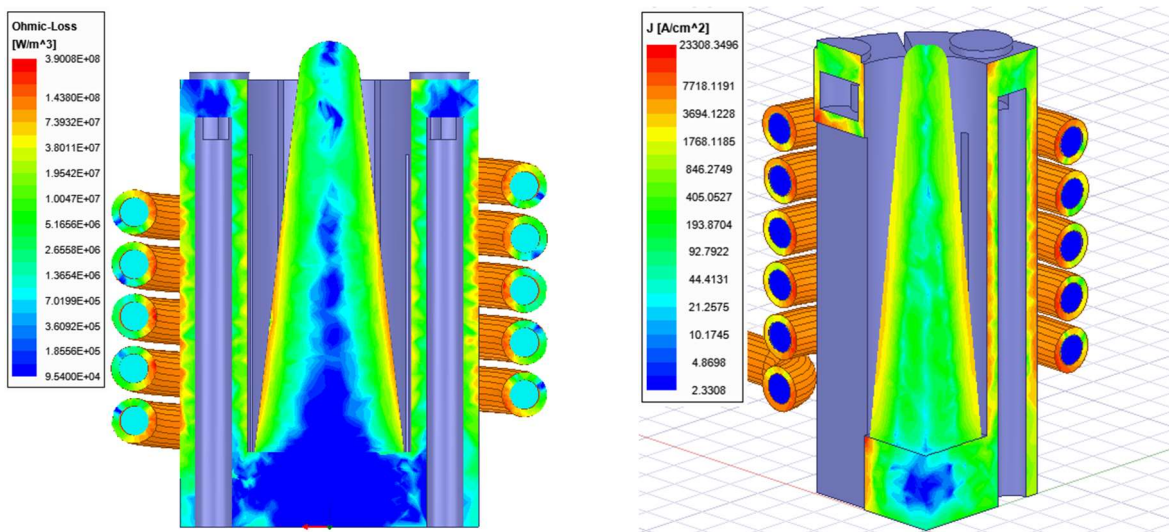
Výsledky simulace pro verifikaci sil jsou dost podobné. Oproti simulaci formování homole (obr. 5.3.2) je síla více soustředěná ve střední části vsázky, to je způsobeno nižší

výškou cívky. Tato cívka tak vyvolává silnější síly soustředěné do menší oblasti vsázky.



Obr. 6.1.3 Síly v homolí v peci CCI22

S postupně rostoucí výškou vsázky dochází k dřívějšímu poklesu sil než v případě formování homole, z toho lze usuzovat, že verze s homolí Ti-6Al-4V bude dosahovat ještě o něco vyšších hodnot než při 7. verzi homole.



Obr. 6.1.4 Jouleovy ztráty (vlevo), proudová hustota (vpravo) v peci CCI22

Výsledky rozložení Jouleových ztrát i proudové hustoty jsou podobné řešení s Ti-6Al-4V, jejich hodnoty však nejsou stejné již vzhledem k samotným materiálovým

vlastnostem a rozdílech v geometrii cívky.

S ohledem na rozdílné materiálové vlastnosti vsázky i konstrukční změny napájecího induktoru jsou v simulaci vidět jasné podobnosti s navrženým modelem pro tavbu Ti-6Al-4V, verifikaci elektrické části výpočtu lze tak považovat za úspěšnou.

6.2 Numerické ověření teplotní simulace

Pro ověření tepelného výpočtu je využito tavení oceli v kelímku CCI45, ten je oproti předchozí verzi větší. Tato tavba byla zvolena proto, že nedochází vlivem chlazení k roztavení vsázky.

Tento kelímek společně a k němu vyrobenou cívku byl použit 9.11.2017 k ohřevu ocelového válce vloženého do kelímku.

H [Am]	B [T]
0,0	0,000
238,7	0,200
318,3	0,320
358,1	0,400
437,7	0,501
477,5	0,561
636,6	0,791
795,8	0,931
1114,1	1,101
1273,2	1,201
1591,5	1,302
2228,2	1,403
3183,1	1,524
4774,6	1,626
6366,2	1,698
7957,7	1,730
15915,5	1,870
31831,0	1,990
47746,5	2,040
63662,0	2,070
79577,5	2,095
159155,0	2,200
318310,0	2,400

Tab. 9: Parametry hysterezní křivky oceli

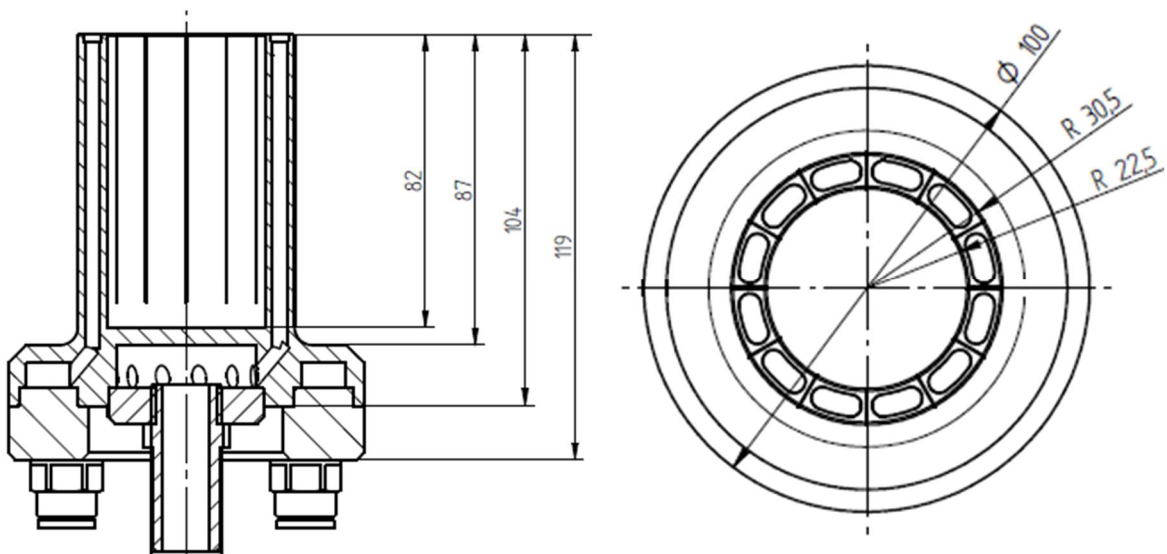
Oproti jiným uvažovaným materiálům vsázky je ocel vzhledem k velké přítomnosti železa feromagnetická. Pro výpočet je tedy použita hysterezní křivka, ta je ANSYSem již implementována.

γ_{St}	2	MS/m
ρ_{St}	7872	kg/m ³
λ_{St}	45	W/m*K
$C_p St$	448	J/kg*K

Tab. 10: Materiálové vlastnosti oceli

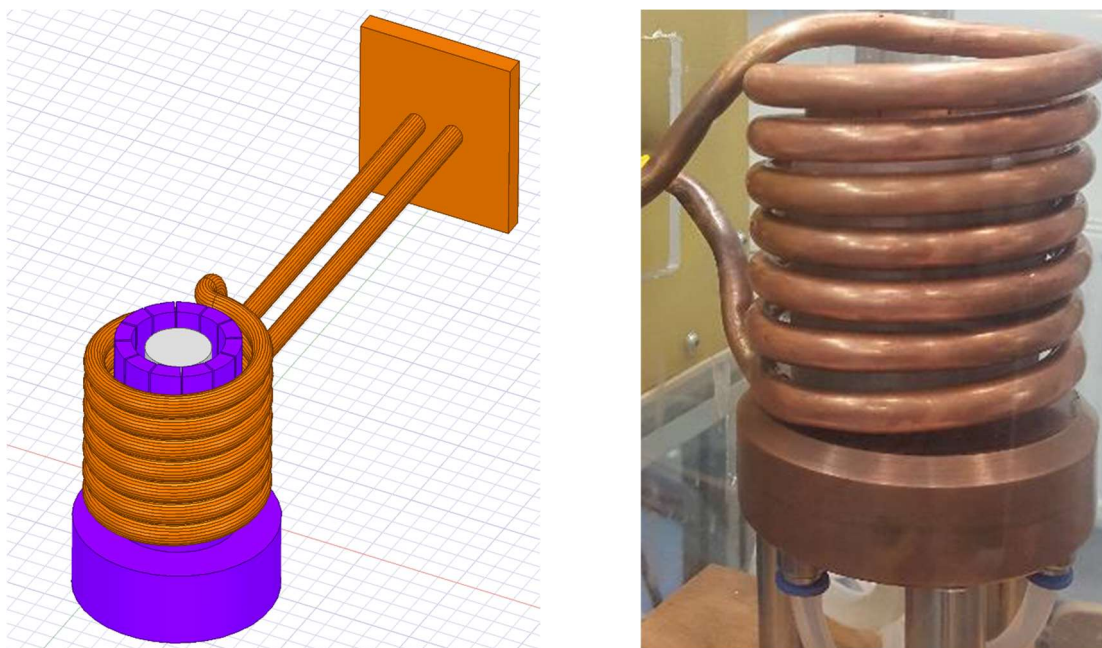
Parametry cívky	Velikost	Rozměry
poč. závitů	7	–
výška cívky	80	mm
délka přívodu	200	mm
poloměr vodiče	5	mm
poloměr chlazení	4	mm
poloměr cívky	40,25	mm
výška vsázky	78	mm
poloměr vsázky	16	mm

Tab. 11: Geometrie cívky a vsázky CCI45 [25]



Obr. 6.2.1 Geometrie segmentového kelímku CCI45 [25]

Vzhledem ke kolizím ve výpočtu byla upravena geometrie přívodních vodičů cívky. Oproti vyrobené cívce jsou tak přívodní vodiče místo diagonálního směru vedeny kolmo k závitům cívky a přes 90° koleno následně souběžně k bloku reprezentujícímu připojené místo ke generátoru.



Obr. 6.2.2 Studený kelímeček CCI45 model (vlevo), vyrobený (vpravo) [25]

Impedance cívky simulace a provedeného měření jsou blízké. Hlavní příčinou nepřesnosti je změna geometrie přívodních vodičů, tato změna způsobuje prodloužení proudové dráhy a souběžné vedení dvou vodičů, to ovlivňuje velikost odporu i výsledné indukčnosti. Touto změnou jsou obě veličiny ovlivněny kladně.

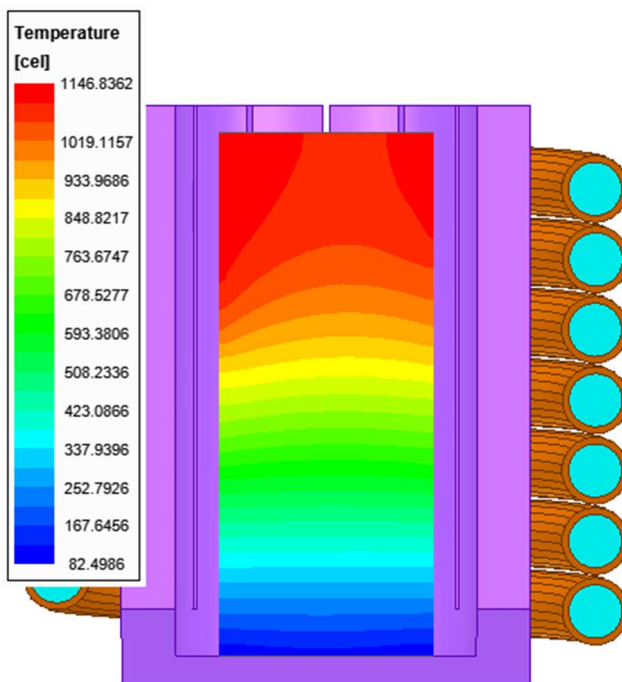
	R [mΩ]	L [μH]	Z [mΩ]
Simulace	17,5	1,7	118,3
Měření	16,2	1,5	102
Chyba	8,02%	13,33%	15,98%

Tab. 12: Parametry cívky CCI45 [25]

Následná simulace počítá, stejně jako v případě tavení Ti-6Al-4V, s Jouleovými ztrátami navázanými na výpočet teplotního pole. Pro samotný výpočet je stanovena frekvence odpovídající hodnotě použité při ohřevu, konkrétně se jedná o hodnotu 10,7 kHz.

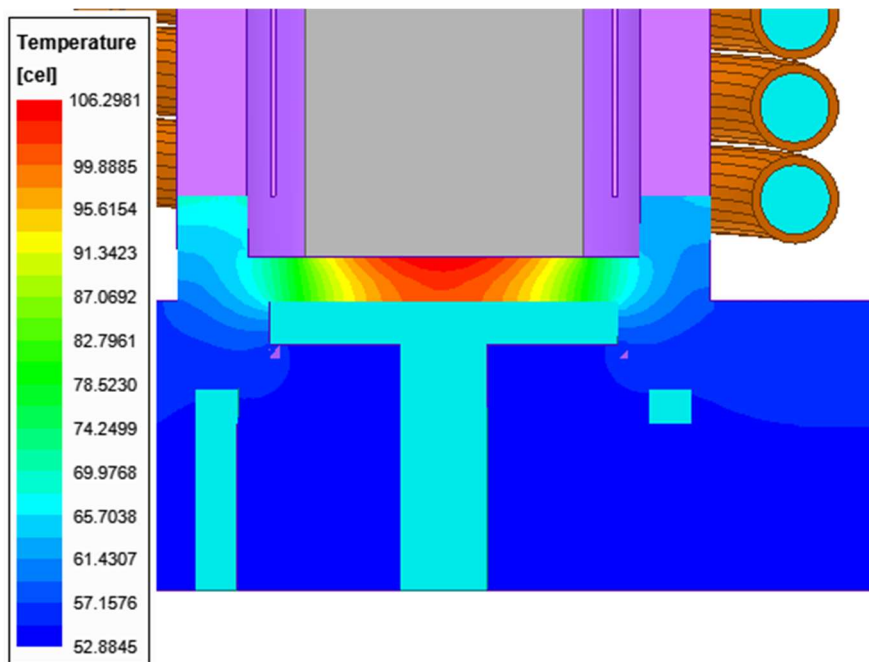
Hodnota proudu je nastavena tak, aby došlo k dosažení teploty blízké změřené teplotě za 216 sekund, po kterou ohřev probíhal, tato hodnota odpovídá 600A. Doba ohřevu byla zjištěna z tabulky dostupné z měření.

Samotné teplotní pole ingotu je rozloženo podobně jako při tavení válcové vsázky Ti-6Al-4V (obr. 5.2.4). Nejvyšší teploty vsázky tak odpovídají obvodu válce v horních částech vsázky. Se vzdáleností postupující do středu se hodnoty teploty následně snižují.



Obr. 6.2.3 Ohřev válcové vsázky v CCI45 po 216s

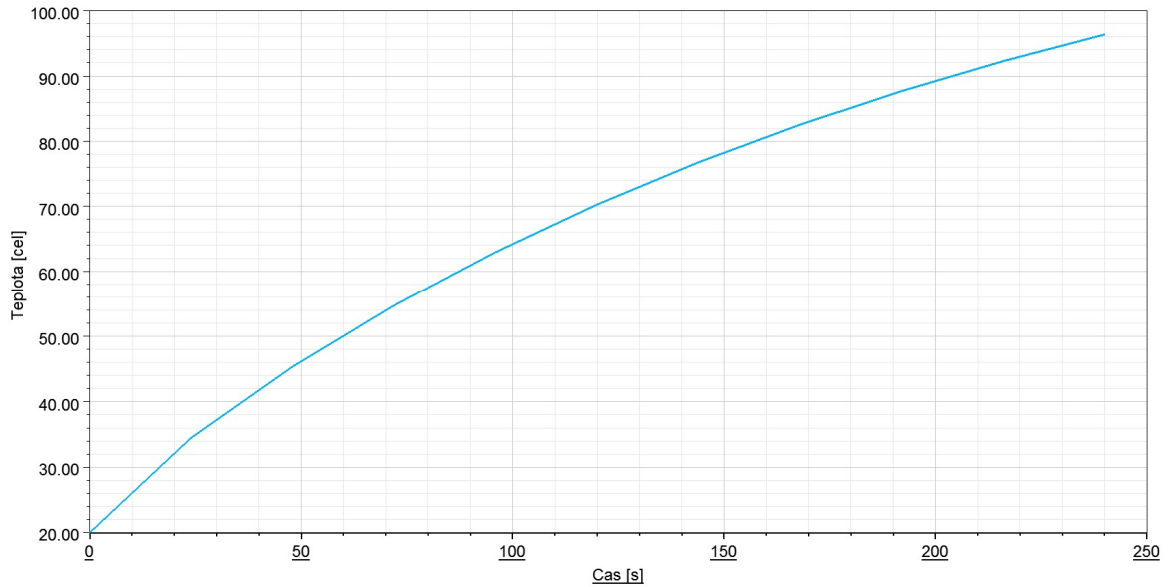
S klesající výškou ve vsázce roste vliv chlazeného segmentového kelímku, to se projevuje zploštěním křivek, které reprezentují jednotlivé teplotní hladiny. Horní křivky tak se vzdáleností od osy vsázky značně klesají, zatímco spodní hladiny reprezentují křivky téměř vodorovné.



Obr. 6.2.4 Odvod tepla segmentovým kelímkem CCI45

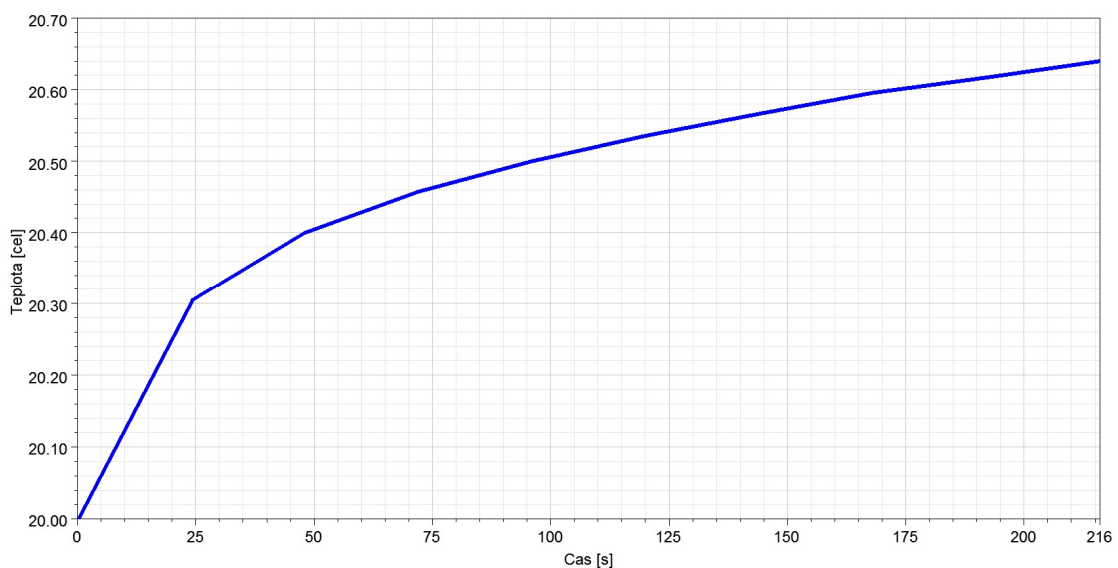
Následné vodní chlazení kelímku se stará o odvod tepla ze systému. Zde je oproti

vlastnímu návrhu celý kelímek včetně vodního kolektoru měděný, to způsobuje lepší rozložení teplot v celém kelímku i kolektoru. Tloušťka dna je zde oproti vlastnímu návrhu poloviční, to zajišťuje lepší odvod tepla z kelímku a snižuje tak teplotu kelímku samotného. Průběh teplot jako takových je navzdory konstrukčním rozdílům vlastnímu návrhu podobný.



Obr. 6.2.5 Přenos tepla dnem segmentového kelímku CCI45

Křivka přenosu tepla dnem je podobná té při tavení slitiny titanu. Výsledná teplota dna je zde nižší. To může být způsobeno větší plochou dna kelímku, současně vložená vsázka také nevyplňuje celou plochu dna.



Obr. 6.2.6 Ohřev chladicí vody

Křivka výsledné teploty chladící vody kelímku tvarem odpovídá taktéž. Vlivem celkové nižší teploty dna, a hlavně větším množstvím chladící vody je výsledná teplota nižší.

S ohledem na všechny konstrukční změny jsou v simulaci vidět jasné podobnosti výsledných veličin CCI45 s navrženým modelem pro tavbu Ti-6Al-4V. Z toho lze usuzovat správnost navrženého řešení.

Závěr

Cílem této práce byl návrh ohřevu tavení titanových slitin elektromagnetickou indukci. Pro tento návrh bylo využito konstrukce studeného kelímku pro tavení reaktivních kovů. Tato technologie umožňuje tyto kovy tavit s vysokou čistotou oproti jiným konstrukčním řešením. Rovněž lze vlivem elektrodynamického řízení využít tavbu ve studeném kelímku i pro legování kovů.

Úvodní kapitoly této práce zajišťují teoretický základ, konstrukční provedení a nastínění průběhu tavby. Tyto informace byly následně využity pro návrh numerického modelu studeného kelímku, s konstrukcí upravenou pro tavení reaktivních kovů.

Jako vsázka pro tento výpočet byla zvolena slitina Ti-6Al-4V, a to s ohledem na její časté zastoupení mezi titanovými slitinami, a taktéž pro její nižší náročnost na velikost napájecího proudu. Pro tuto slitinu byly vypracovány teplotní závislosti parametrů, aby došlo ke zjištění optimálních hodnot pro výpočet slabě sdružené úlohy.

Vlivem materiálových vlastností bylo pro tavení nutné zvolit vyšší hodnotu frekvence, než by byla nutná pro čistý titan. Současně však došlo vlivem značně nižší tepelné vodivosti dochází k menšímu odvodu tepla chlazeným kelímkem. To vede k rychlejšímu ohřevu při stejném proudu napájecí cívky a zajišťuje tak ohřev s vyšší účinností a za kratší časový úsek.

Cívka byla navržena tak, aby došlo k rovnoměrnému rozložení sil ve výšce výsledně vytvarované homole. Současně je umístěna tak, aby oblast s největšími Jouleovými ztrátami zasahovala do horní oblasti plné válcové vsázky.

Definováním modelů homole společně s ověřením silových účinků při tavbě Sn97Cu3 došlo k přibližnému určení konečného tvaru výsledné homole. Jako další postup pro zpřesnění výpočtu by bylo navržení modelu, který by zahrnoval víření roztavených částí taveniny. To by vedlo k získání informace o přesnějším konečném tvaru homole, pro toto řešení je však nutno v současnosti zvolit jiný software.

Navržený systém chlazení umožňuje získ reálných výsledků teplotního pole a simulací, z nichž lze zjistit dobu nutnou pro oteplení materiálu na požadovanou teplotu. Tento chladicí systém je vytvořen pouze pro simulaci chlazení, pro reálný provoz je kolektor nutno na spodní straně kelímku dále upravit.

Ze zjištěného průběhu oteplení vody lze usoudit výsledné oteplení vody o necelé 2°C, pro takto nízké oteplení by bylo možné využít pasivní systém chlazení napájecí vody. Absence aktivního chlazení tak povede k celkové jednodušší konstrukci chladicího okruhu.

V závěru práce z verifikace výsledků lze jasně vyzorovat podobnost modelů se zde navrženou pecí. Vzhledem k této skutečnosti lze usuzovat správnost vytvořeného numerického modelu.

Seznam literatury

- [1] Mühlbauer A.: *History of induction heating & melting*, Essen 2008, ISBN 978-3-8027-2946-1
- [2] Rot D., Kožený J.: *Modelování startu tavby oxidů kovů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku*, ZČU Plzeň 2010, dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/592/1/r4c4c1.pdf>
- [3] Laboratoř studených kelímků, dostupné z: <http://susen2020.cz/projekty/infrastruktura/vyhled-2015-infrastruktura-projektu-susen/laborator-studenych-kelimku/>
- [4] Mayer D, Polák J.: *Metody řešení elektrických a magnetických polí*, Praha 1995
- [5] Langer E.: *Teorie Indukčního a Dielektrického tepla*, Praha 1984
- [6] Totten G.: *Volume 4C Induction heating and heat treatment*, ASM International 2014, ISBN-13: 978-1-62708-012-5
- [7] Doležel I., Musil L.: *Moderní průmyslové technologie založené na procesech v tekutých kovech řízených elektromagnetickým polem*, 2003, dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/moderni-prumyslove-technologie-zalozene-na-procesech-v-tekutych-kovech-rizenych-elektromagnetickym-polem--14316>
- [8] Dolejš R.: *Proces spuštění tavby ve studeném kelímku*, Diplomová práce, ZČU Plzeň 2011
- [9] Langer E., Kožený J.: *Elektrotepelná zařízení indukční Základy teorie, výpočty a konstrukce*, ZČU Plzeň 1982
- [10] Hradílek Z., Lázníčková I., Král V.: *Elektrotepelná technika*, ČVUT v Praze, Praha 2011, ISBN 978-80-01-04938-9. dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/cvut-3-elektrotepeln.pdf>
- [11] Jiřinec S.: *Vysokoteplotní tavení nekovových materiálů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku*, Disertační práce, ZČU Plzeň 2017, dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/33612/1/Disertace_JIRINEC.pdf
- [12] Langer E.: *Elektrotepelná technika, část I+II*; VŠSE, vydání II., ZČU Plzeň 1974
- [13] Zajacová N.: *Vysokoteplotní tavení materiálů ve studeném kelímku*, Diplomová práce, ZČU Plzeň 2012, dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/2663/1/DP_Zajacova_2012.PDF

- [14] Rot D., Kožený J., Jiřinec S., Jiřinec J., Poznyak I.: *Induction melting of aluminium oxide in the cold crucible*, Kouty nad Desnou 2017, ISBN 978-1-5090-6406-9, dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7967281/>
- [15] Rot D., Kožený J., Jiřinec S., Jiřinec J., Podhrazky A., Poznyak I.: *Experimental design of the cold crucible*, Praha 2016, ISBN 978-1-5090-0908-4, dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7521746/>
- [16] Reed S.: *Induction skull melting offers ti investment casting benefits*, 2001, dostupné z: <https://www.industrialheating.com/articles/83906-induction-skull-melting-offers-ti-investment-casting-benefits>
- [17] Broihanne G.: *New Spi on Titanium Casting Technology*, 2001, dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=286>
- [18] Guo J., Jia J., Lin Y.: *Evaporation behavior of aluminium during the cold crucible induction skull melting of titanium aluminum alloys*, 2000, dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11663-000-0120-1>
- [19] Wu X.: *Review of alloy and process development of TiAl alloys*, Edgbaston 2006, The University of Birmingham, dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966979506000823>
- [20] Šupálek M.: *Přesné lití turbínových kol turbodmychadel ze slitin TiAl*, VUT Brno 2009, diplomová práce, dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30306693.pdf>
- [21] Vnouček M.: *Titan a jeho slitiny*, přednášky Strojírenské materiály, ZČU Plzeň 2009, dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/nikl-titan-09_10.pdf
- [22] Osiko V., Mikhail B., Lomonova E.: *Synthesis of Refractory Materials by Skull Melting Technique*, 2010, ISSN 1349-7979, dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/226166782_Synthesis_of_Refractory_Materials_by_Skull_Melting_Technique
- [23] Jiřinec S., Rot D.: *Cold crucible HFG150*, ZČU Plzeň 2017, dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/25707/1/Jirinec.pdf>
- [24] Gombert D., Richardson J.: *Cold Crucible Induction Melter Technology: Results of Laboratory Directed Research and Development*, Idaho 2001, dostupné z: <https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/3024978.pdf>
- [25] Rot D.: *Návrh studeného kelímku (CC) pro tavení kovů*, ZČU Plzeň
- [26] Sugidal G., Kumar S., Mishra S.: *Development of Induction Skull melting Technology*, Thombai India 2015, dostupné z: <http://www.barc.gov.in/publications/nl/2015/2015111211.pdf>

- [27] Xu D., Jia L., Fu H.: *Effects of centrifugal and Coriolis forces on the mold-filling behavior of titanium melts in vertically rotating molds*, China 2008, dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/e34f/1bb79c65467a02345c00640055a2b90a191c.pdf>
- [28] Losertová M.: *Titan a jeho slitiny*, VŠB Ostrava 2010, dostupné z: <https://docplayer.cz/18203067-Titan-a-jeho-slitiny-cisty-titan-slitiny-titanu-a-slitiny-na-bazi-intermetalicky-fazi-tial-a-ti-3-al-slitiny-na-bazi-tini-jev-tvarove-pameti.html>
- [29] Zinn S., Semiatin S.: *Elements of induction heating: design, control and applications*, Electric Power Research Institute Inc., California 1998, ISBN-10:0-87170-308-4
- [30] Duda J.: *Tavení oxidů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku*, ZČU Plzeň 2018, diplomová práce
- [31] Doležel I., Karban P., Šolin P.: *Integral methods in low-frequency electromagnetics*, Hoboken, N.J.: Wiley, c2009. ISBN 04-701-9550-9
- [32] Vrbka M, Vaverka M.: *Metoda konečný prvků*, VUT Brno, dostupné z: http://www.shigley.cz/images/texts/file/prednaska1_mkp.pdf
- [33] Duda J.: *Tavení oxidů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku*, ZČU Plzeň 2018, diplomová práce, dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/31558/1/DP_Jan%20Duda-2018_FINAL.pdf
- [34] ASM: *Titanium Ti-6Al-4V (Grade 5) Annealed*, Aerospace Specification Metals dostupné z: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MTP641>
- [35] Boyer R., Welsch G., Collings E.: *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*, 1994 ASM International, ISBN-10:0-87170-481-1
- [36] Zhang W., Reddy B., Deevi S.: *Physical properties of TiAl-base alloys*, Richmond USA 2001, dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646201010752>
- [37] Rot D.: *Rovnice elektrodynamických potenciálů*, FEL ZČU, materiály předmětu ETPR
- [38] Vijayaragjvam L., Hemachandra Reddy K.: *Emerging Trends in Mechanical Engineering: Select Proceeding of ICETME 2018*, Springer Nature Singapore 2020, ISBN 978-981-32-9930-6, dostupné z: https://books.google.cz/books?id=gKjDDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=c&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

- [39] ISO Solder Alloy 402, dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/ISO-Solder-Alloy-402-IEC-C30-Sn97Cu3>

Přílohy

Příloha A – Script v programu Wolfram Mathematica pro výpočet frekvenčních závislostí a , x_2

```
In[38]:= f=83000 ;
γ=548546 ;
γti=2380000 ;
μ=1.00005 ;
μti= 1.00002;
r=0.01 ;
```

```
a=Sqrt[2/(2π f 4 π 10^-7 γ μ)]
Subscript[x, 2]= (Sqrt[2]r)/a
```

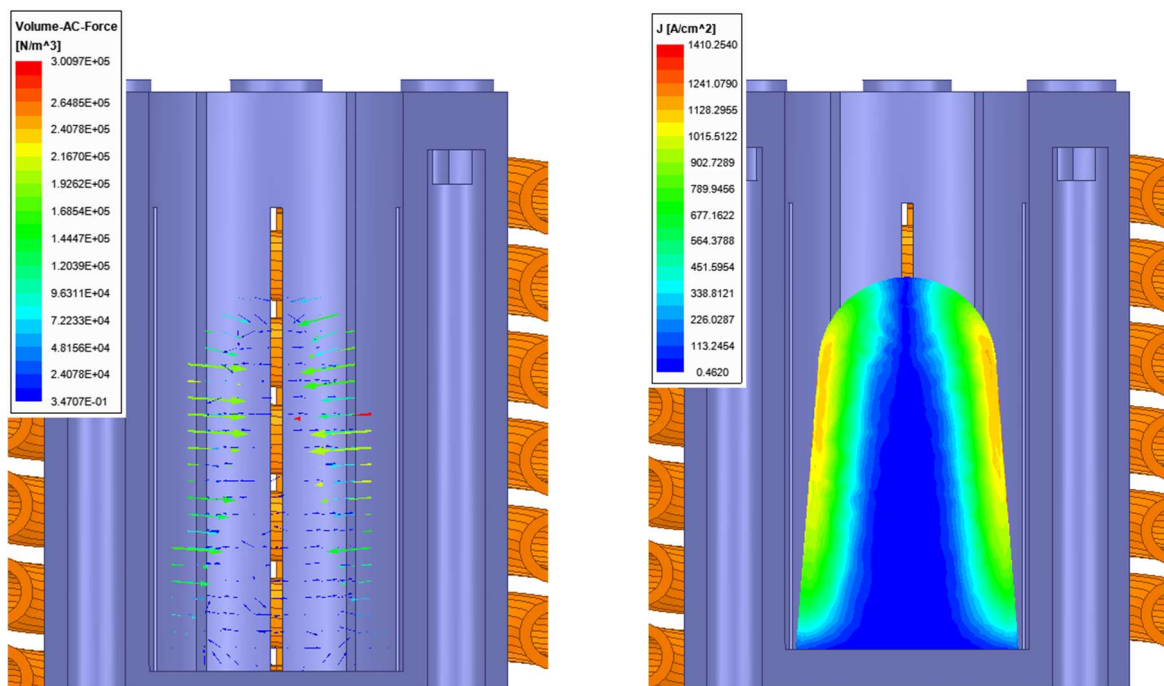
```
depth=Plot[ {Sqrt[2/((2*Pi*x*4*Pi*γ*μ)/10^7)],Sqrt[2/((2*Pi*x*4*Pi*γti*μti)/10^7)]}, {x,5000,10000}, PlotLegends->{"Ti-6Al-4V","Čistý Titan"},Frame->True, GridLines->Automatic, FrameLabel->{{"Hloubka vniku [m]",""}, {"Frekvence [Hz]",""} } ]
```

```
argument=Plot[ {Sqrt[2]*r/Sqrt[2/(2*π*freq*4*π*10^-7*γ*μ)], Sqrt[2]*r/Sqrt[2/(2*π*freq*4*π*10^-7*γti*μti)]}, {freq,5000,10000},PlotLegends->{"Ti-6Al-4V","Čistý Titan"}, Frame->True, GridLines->Automatic, FrameLabel->{{"Argument X2 [-]",""}, {"Frekvence [Hz]",""} } ]
```

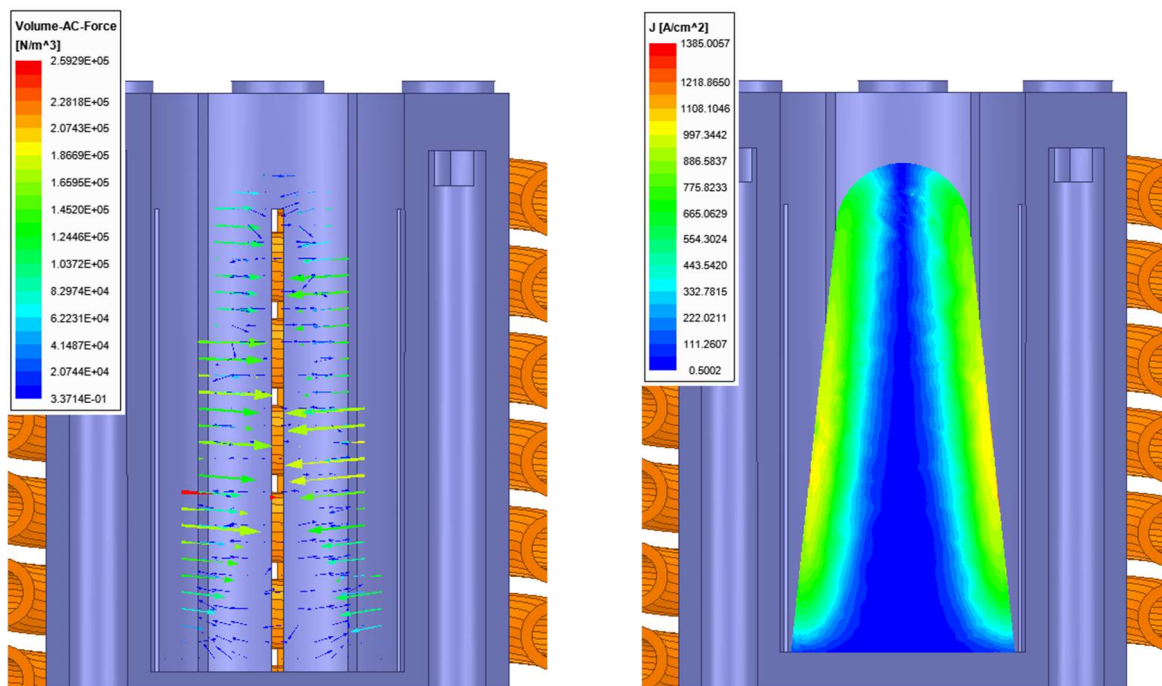
```
Export["Hloubka vniku.png",depth];
```

```
Export["Argumen X2.png",argument];
```

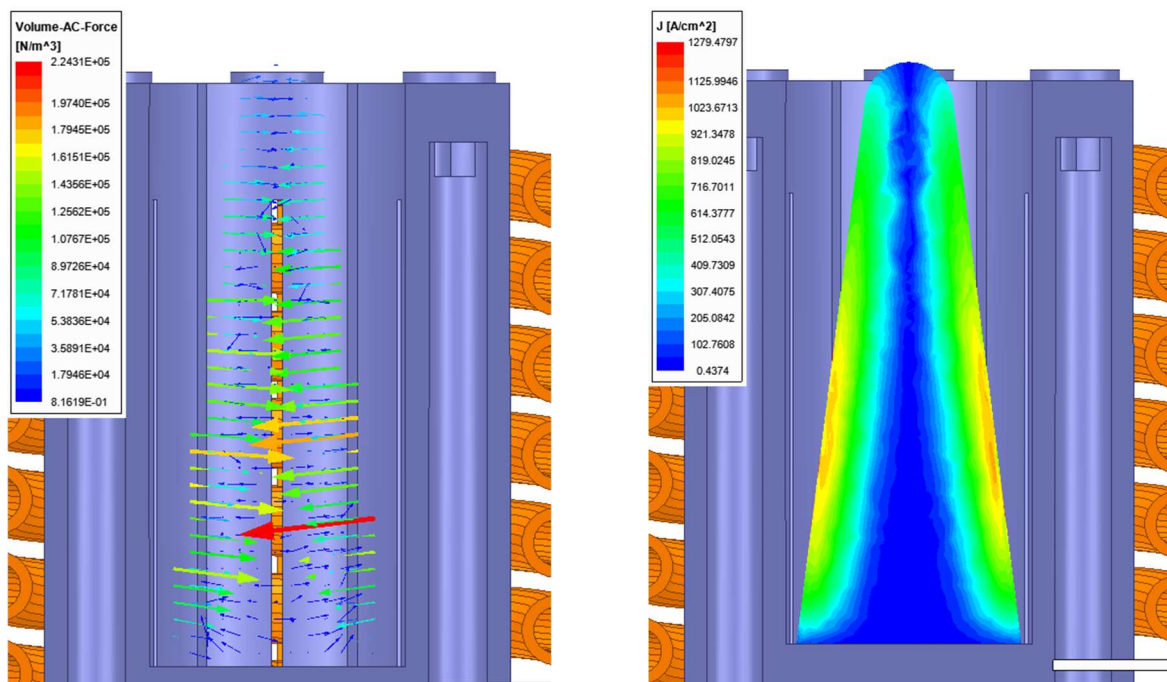
Příloha B – Rozložení sil a proudových hustot ve zbývajících verzích homole



Obr. 0.1 Rozložení proudové hustoty a sil v 2. verzi homole



Obr. 0.2 Rozložení proudové hustoty a sil v 4. verzi homole



Obr. 0.3 Rozložení proudové hustoty a sil v 6. verzi homole