

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Vysokoteplotní tavení materiálů ve studeném kelímku**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Nikola ZAJACOVÁ**  
Osobní číslo: **E09N0062P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Vysokoteplotní tavení materiálů ve studeném kelímku**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Objasněte tavení elektromagnetickou indukcí ve "studeném kelímku".
2. Uveďte přednosti a nevýhody tohoto způsobu tavení.
3. Uveďte fyzikální princip tavení elektromagnetickou indukcí.
4. Stanovte předpoklady pro efektivní tavení různých materiálů.
5. Uveďte praktické aplikace .

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **18. října 2010**  
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 18. října 2011

## **Anotace**

V této diplomové práci jsou shromážděny informace o principu indukčního tavení materiálů ve studeném kelímku (ISM). Práce je rozdělena do pěti hlavních kapitol. První část se zabývá technologiemi tavení řízenými elektromagnetickým polem, druhá část je věnována metodě studeného kelímku, kde je popsána historie, princip tavení a konstrukce studeného kelímku. Ve třetí části jsou shrnuty přednosti a nevýhody tohoto způsobu tavení. Ve čtvrté kapitole jsou uvedeny optimální podmínky pro tavení elektricky nevodivých materiálů s analytickým výpočtem pro konkrétní materiál ( $ZrO_2$ ). Následující část se zabývá tavením elektricky vodivých materiálů. V rámci této kapitoly byla pomocí metody konečných prvků provedena případová studie možnosti aplikace tavení ve studeném kelímku pro případ zpracování titanu. Byl vytvořen zjednodušený model tavícího zařízení, na němž bylo zkoumáno rozložení elektromagnetického a teplotního pole. Závěrem bylo provedeno celkové zhodnocení získaných poznatků.

## **Klíčová slova**

Technologie tavení řízené elektromagnetickým polem, indukční tavení, Maxwellovy rovnice, studený kelímek, zhodnocení procesu tavení, tavení elektricky nevodivých materiálů, tavení elektricky vodivých materiálů

## **Abstract**

This thesis collects comprehensive information about induction skull melting process (ISM). Thesis is divided into five chapters. First chapter deals with electromagnetic field controlled melting technologies; the second is devoted to induction skull melting method whereas the history, physical principles and construction of cold crucible are described. The advantages and disadvantages of ISM process are summarized in third chapter. In the next chapter, the optimum conditions for electrical non-conductive materials melting are introduced, with the addition of analytical computation for selected material ( $ZrO_2$ ). Similarly, the following chapter is concerned with electrical conductive materials melting. In addition, a case study of ISM process for titanium melting was performed using Finite Element Method (FEM). A simplified model of melting device was created and the distributions of electromagnetic and temperature fields were investigated. In the end, the obtained knowledge were summarized.

## **Key words**

Electromagnetic field controlled melting technologies, induction melting, Maxwell equations, cold crucible, ISM process review, melting of electrical non-conductive materials, melting of electrical conductive materials

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

V Plzni dne 9.5.2012

Nikola Zajacová

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala především vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky při zpracování diplomové práce a uskutečnění konzultací s doc. Ing. Igorem Pozniakem. Dále bych také chtěla poděkovat Ing. Vladimíru Kindlovi, Ph.D. za čas, který mi věnoval při tvorbě modelu v programu ANSYS.

**OBSAH**

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>TECHNOLOGIE ŘÍZENÉ ELEKTROMAGNETICKÝM POLEM... 2</b>	
2.1	ELEKTROMAGNETICKÉ MÍCHÁNÍ.....	3
2.2	LEVITAČNÍ TAVENÍ.....	5
2.3	INDUKČNÍ TAVENÍ V KELÍMKOVÝCH A KANÁLKOVÝCH PECÍCH .....	6
<b>3</b>	<b>METODA TAVENÍ VE STUDENÉM KELÍMKU .....</b>	<b>8</b>
3.1	HISTORICKÝ VÝVOJ A PŘEHLED PRAKTICKÉHO VYUŽITÍ METODY .....	8
3.1.1	<i>Proces tavení kovů a polovodičů ve studeném kelímku .....</i>	<i>8</i>
3.1.2	<i>Zpracování křemíku .....</i>	<i>8</i>
3.1.3	<i>Zpracování kovů .....</i>	<i>11</i>
3.1.4	<i>Zpracování nebezpečného odpadu.....</i>	<i>12</i>
3.2	PRINCIP TAVENÍ VE STUDENÉM KELÍMKU .....	13
3.2.1	<i>Indukční ohřev .....</i>	<i>14</i>
3.2.2	<i>Princip indukčního ohřevu.....</i>	<i>19</i>
3.2.3	<i>Přenos elektromagnetické energie.....</i>	<i>20</i>
3.3	KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ KELÍMKU .....	20
3.3.1	<i>Kelímek jako cívka .....</i>	<i>21</i>
3.3.2	<i>Kelímek tvořený segmenty .....</i>	<i>22</i>
<b>4</b>	<b>ZHODNOCENÍ PROCESU TAVBY METODOU STUDENÉHO KELÍMKU .....</b>	<b>25</b>
4.1	VÝHODY ISM .....	25
4.2	NEVÝHODY ISM.....	27
<b>5</b>	<b>TAVENÍ ELEKTRICKY NEVODIVÝCH MATERIÁLŮ .....</b>	<b>29</b>
5.1	PROCES TAVENÍ.....	30
5.1.1	<i>Objemový ohřev.....</i>	<i>30</i>



5.1.2	<i>Povrchový ohřev</i> .....	32
5.1.3	<i>Fáze tavení nevodivých materiálů ve studeném kelímku</i> .....	33
5.1.4	<i>Metoda směrové tuhnutí</i> .....	34
5.1.5	<i>Czochralského metoda</i> .....	35
5.1.6	<i>Analytický výpočet tavení nevodivého materiálu <math>ZrO_2</math> v ustáleném stavu</i> .....	36
5.1.7	<i>Tavení <math>ZrO_2</math></i> .....	41
<b>6</b>	<b>TAVENÍ ELEKTRICKY VODIVÝCH MATERIÁLŮ</b> .....	<b>42</b>
6.1	TAVENÍ TITANU .....	43
6.2	PŘÍPADOVÁ STUDIE TAVENÍ TITANU METODOU ISM.....	46
6.2.1	<i>Numerický model</i> .....	47
6.2.2	<i>Výsledky numerických analýz</i> .....	50
6.2.3	<i>Shrnutí numerického modelování ISM</i> .....	55
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>56</b>
<b>8</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>58</b>

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1: Základní princip magnetohydrodynamiky kovů .....	2
Obr. 2: Odlévání hliníku a mědi .....	3
Obr. 3: Odlévání oceli.....	3
Obr. 4: Míchání taveniny rotujícím magnetickým polem.....	4
Obr. 5: Míchání taveniny induktorem protékaným střídavým proudem $I$ o kmitočtu $f$ .....	4
Obr. 6: Levitační tavení soustavou induktorů.....	5
Obr. 7: Konstrukční uspořádání kelímkové indukční pece.....	6
Obr. 8: Konstrukční uspořádání kanálkové indukční pece .....	7
Obr. 9: Indukční ohřev vodou chlazené „stříbrné loďky“ .....	9
Obr. 10: Horizontální indukční tavení .....	9
Obr. 11: Kontinuální lití křemíku ve studeném kelímku .....	10
Obr. 12: Kontinuální lití ve studeném kelímku, schematicky .....	12
Obr. 13: Schéma indukčního tavení ve studeném kelímku .....	13
Obr. 14: Rozložení intenzity magnetického pole ve válcové vsázce v závislosti na parametru $x_2$ .....	17
Obr. 15: Rozložení proudové hustoty magnetického pole ve válcové vsázce v závislosti na parametru $x_2$ .....	17
Obr. 16: Princip indukčního ohřevu .....	19
Obr. 17: Princip přenosu energie ve studeném kelímku .....	20
Obr. 18: Orientace vektorů .....	20
Obr. 19: Reálný kelímek s integrovaným induktorem.....	21
Obr. 20: Kelímek s integrovaným induktorem .....	21
Obr. 21: Tvary segmentů studeného kelímku .....	22
Obr. 22: Graf závislosti účinnosti na počtu segmentů .....	23
Obr. 23: Klasický studený kelímek tvořený segmenty .....	23
Obr. 24: Pronikání magnetického pole segmenty .....	24
Obr. 25: Provázanost hodnotících kritérií.....	28
Obr. 26: Závislost měrného odporu na teplotě .....	29
Obr. 27: Startovací metoda s elektricky vodivým materiálem .....	31
Obr. 28: Startovací proces s grafitovým kroužkem .....	31
Obr. 29: Princip směrového tuhnutí.....	35
Obr. 30: Průřez zařízení .....	35

Obr. 31: Dolní průřez zařízení .....	35
Obr. 32: Náhradní obvod .....	36
Obr. 33: Návrh studeného kelímku .....	37
Obr. 34: Technologický postup ISM .....	41
Obr. 35: Tavenina ZrO <sub>2</sub> v ustáleném stavu .....	42
Obr. 36: Ingot ZrO <sub>2</sub> po vychladnutí .....	42
Obr. 37: Jednokomorová pec s odstředivou licí deskou pro 10 kg vsázku .....	44
Obr. 38: Lití vsázky z ISM pece do formy .....	44
Obr. 39: Odlitky z titanu vyrobené metodou ISM .....	46
Obr. 40: Odlitek raketové trysky .....	46
Obr. 41: Fáze principu MKP .....	47
Obr. 42: Fáze výrobku .....	47
Obr. 43: CAD model studeného kelímku .....	48
Obr. 44: Zdiskretizovaný model studeného kelímku .....	49
Obr. 45: Rozložení proudové hustoty v celém zařízení .....	50
Obr. 46: Rozložení proudové hustoty ve vsázce .....	51
Obr. 47: Rozložení proudové hustoty v chlazených trubkách .....	51
Obr. 48: Rozložení elektromagnetické indukce v celém zařízení .....	52
Obr. 49: Rozložení elektromagnetické indukce v celém zařízení v centrálním řezu .....	52
Obr. 50: Rozložení Jouleových ztrát v tělese vsázky .....	53
Obr. 51: Rozložení teploty na tělese vsázky v čase t=60s .....	53
Obr. 52: Rozložení teploty na tělese vsázky v čase t=1200s .....	53
Obr. 53: Výběr uzlů na tělese vsázky .....	54
Obr. 54: Časový průběh teploty ve vybraných uzlech .....	54

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Celý název	Jednotky
E	Intenzita elektrického pole	V/m
H	Intenzita magnetického pole	A/m
J	Hustota proudu	A/m <sup>2</sup>
<b>E</b>	Vektor intenzity elektrického pole	V/m
<b>H</b>	Vektor intenzity magnetického pole	A/m
<b>D</b>	Vektor indukce elektrického pole	C/m <sup>2</sup>
<b>B</b>	Vektor indukce magnetického pole	T
Ψ	Elektrický indukční tok	C
Φ	Magnetický indukční tok	Wb
γ	Elektrická konduktivita	S/m
ε <sub>0</sub>	Permitivita vakua	F/m
ε <sub>r</sub>	Relativní permitivita	-
ε	Stupeň černosti	-
μ	Permeabilita	H/m
μ <sub>0</sub>	Permeabilita vakua	H/m
μ <sub>r</sub>	Relativní permeabilita	-
ρ	Hustota nábojů	C/m <sup>3</sup>
ρ <sub>1</sub>	Měrný odpor materiálu induktoru	Ω·m
ρ <sub>2</sub>	Měrný odpor materiálu vsázky	Ω·m
v	Rychlost šíření vlny prostředím	m/s
<b>S</b>	Poyntingův zářivý vektor	W/cm <sup>2</sup>
a	Hloubka vniku naindukovaných proudů	m
ω	Úhlová rychlost	rad/s
r <sub>2</sub>	Poloměr vsázky	m
x <sub>2</sub>	Argument cylindrické funkce	-
η	Účinnost	-
D	Průměr induktoru	m
f	Frekvence	Hz
R <sub>1</sub>	Rezistivita materiálu induktoru	Ω
R <sub>2</sub>	Rezistivita vsázky	Ω
R <sub>3</sub>	Rezistivita materiálu kelímku	Ω
n	Počet segmentů	-
b	Šířka segmentu	m

<b>Značka</b>	<b>Celý název</b>	<b>Jednotky</b>
D	Průměr vsázky	m
g	Množství startovacího kovu	kg
Z	Měrná hmotnost kovu	kg/m <sup>3</sup>
V <sub>T</sub>	Objem taveniny	kg
P <sub>2</sub>	Výkon přenesený z induktoru do taveniny	W
P <sub>L</sub>	Celkové ztráty	W
P <sub>w</sub>	Tepelné ztráty do stěn kelímku	W
P <sub>b</sub>	Tepelné ztráty do dna kelímku	W
P <sub>rad</sub>	Tepelné ztráty sáláním	W
h <sub>2</sub>	Výška kelímku	m
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>
q <sub>w</sub>	Měrné tepelné ztráty do stěn kelímku	W/cm <sup>2</sup>
q <sub>rad</sub>	Měrné tepelné ztráty z povrchu taveniny	W/cm <sup>2</sup>
k <sub>l</sub>	Korekční součinitel	-
s	Tloušťka stěny induktoru	m
X <sub>10</sub>	Reaktance prázdné cívky	Ω
X <sub>0</sub>	Rozptylová reaktance	Ω
S <sub>m</sub>	Plocha ve vzduchové mezeře	m <sup>2</sup>
X <sub>s</sub>	Reaktance ve vzduchové mezeře	Ω
V <sub>st</sub>	Optimální rozmezí objemu startovacího materiálu	cm <sup>3</sup>
m <sub>me</sub>	Optimální množství taveniny	g
p <sub>k</sub>	Transformační poměr	-
X <sub>e</sub>	Ekvivalentní reaktance	Ω
R <sub>e</sub>	Ekvivalentní odpor	Ω
Z <sub>e</sub>	Ekvivalentní impedance	Ω
I	Proud	A
U	Napětí	V
S	Zdánlivý výkon	VA
cosφ	Účinník	-

<b>Zkratka</b>	<b>Anglický název</b>	<b>Český ekvivalent</b>
ISM	Induction Skull Melting	Indukční tavení ve studeném kelímku
VAR	Vacuum Arc Remelting	Přetavování obloukem ve vakuu

# 1 Úvod

Motto:

*„Nic není objeveno a zároveň hned dokonalé“*

Marcus Tullius Cicero

Současný intenzivní výzkum nových materiálů, ale i zdokonalování vlastností materiálů již zavedených, klade vysoké nároky na výrobní technologie. Ať už se jedná o konstrukční materiály určené pro aplikace v elektrotechnickém, strojírenském, leteckém nebo automobilovém průmyslu, bývá limitujícím parametrem způsob přípravy, eventuálně zpracování výchozích materiálů a surovin. V oblasti metalurgie kovů je princip indukčního tavení v klasických elektrotepelných zařízeních využíván již řadu let. Existují však případy, kdy není zapotřebí zpracovávat velké objemy vsázky, a současně extrémní teplota tavení, případně požadovaná vysoká čistota výsledného produktu znemožňuje použití běžných indukčních pecí (kanálkové, kelímkové, atd.). Tehdy se uplatňují různé odvozené nekonvenční metody řízené elektromagnetickým polem, např. elektromagnetické míchání, levitační tavení a indukční tavení ve studeném kelímku.

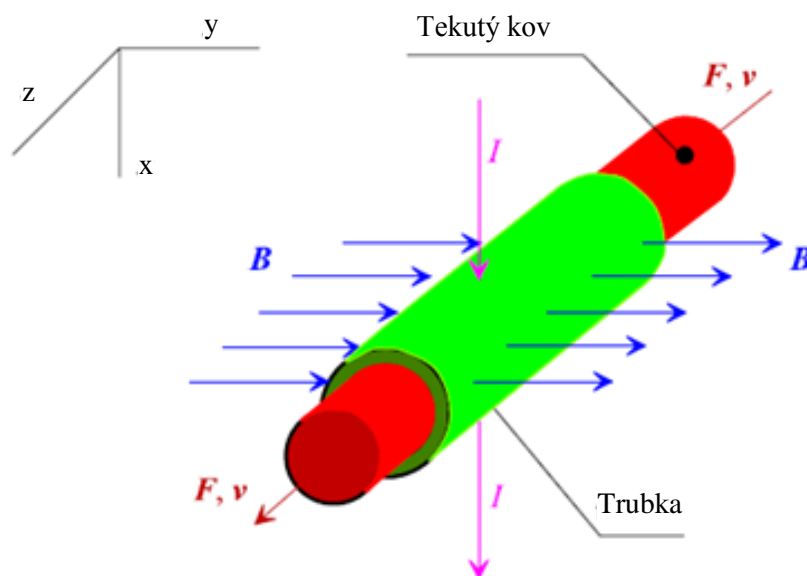
Právě poslední uvedená metoda indukčního tavení ve studeném kelímku (ISM) je předmětem této diplomové práce. Jedná se o poměrně mladou technologii podléhající neustálému vývoji v řadě renomovaných pracovišť po celém světě. Díky svému konstrukčnímu uspořádání lze v zařízeních ISM dosahovat teplot až 3000°C, aniž by došlo k nežádoucí kontaminaci vsázky v důsledku kontaktu s jiným materiálem. Působením elektromagnetických sil s intenzivním chlazením kelímku vodou se na povrchu taveniny vytváří studená kůra (skull), která chrání vlastní vsázku. Toho je s úspěchem využíváno nejen při tavení vysoce reaktivních kovových materiálů, jako jsou např. titan, niob, molybden nebo tantal, ale také obtížně tavitelných elektricky nevodivých materiálů. Širšímu uplatnění této metody dosud brání náklady spojené s pořízením a provozem technologie ISM, a proto je určena především pro speciální aplikace.

Cílem této práce je poskytnout ucelený přehled metody indukčního tavení ve studeném kelímku. V rešeršní části práce bude zmapován historický vývoj a přehled praktického využití této technologie, fyzikální podstata tavení, konstrukční uspořádání kelímku a kritické posouzení procesu ISM. Praktická část bude věnována analytickému stanovení optimálních podmínek tavení elektricky nevodivého oxidu  $ZrO_2$  a dále bude vytvořen numerický model metodou konečných prvků pro případ tavení titanu pomocí programu ANSYS. Závěrem bude provedeno zhodnocení veškerých získaných poznatků.

## 2 Technologie řízené elektromagnetickým polem

Ve dvacátých letech minulého století se začaly zkoumat možnosti řízení procesů elektromagnetickým polem v tekutých kovech. V 50. až 60. letech byly položeny základy takových technologií, jako například elektromagnetické míchaní tekutých kovů, jejich přečerpávání, dávkování a odlévání, levitační tavení, tavení ve studených kelímcích a další.

V osmdesátých letech byl na vědecké konferenci v Cambridge přijat pro zmíněné procesy jednotný název „magnetohydrodynamika kovů“. Základní princip magnetohydrodynamiky kovů je znázorněn na obr. 1. Jedná se o jevy v tekutých kovech, které jsou vyvolány vnějším elektromagnetickým polem. Zpravidla jsou to pole časově či prostorově proměnná. Rozložení elektromagnetického pole je popsáno Maxwellovými rovnicemi. V elektricky vodivé tavenině se indukují vířivé proudy, které vyvolají oteplení a Jouleovy ztráty. Průběh oteplení je popsán pomocí Fourier-Kirchohoffovy rovnice. Silové účinky působící na částice taveniny jsou příčinou proudění, které je popsáno Navier-Stokesovou rovnicí. Všechny uvedené rovnice jsou parciálními diferenciálními rovnicemi a jsou spřaženy prostřednictvím funkcí teplotně závislých materiálových parametrů. Jedná se o magnetickou permeabilitu, měrnou hmotnost, měrné teplo, elektrickou a tepelnou vodivost a další. Stanovení okrajových podmínek pro jednoznačné řešení takovéto soustavy není jednoduché. Tyto složité sdružené úlohy bývají řešeny pomocí různých konečnoprvkových výpočetních programů, jako např. ANSYS, FLUENT atd. Vzhledem k povaze těchto dějů, se výpočty provádějí téměř výhradně na trojrozměrných modelech. [1]

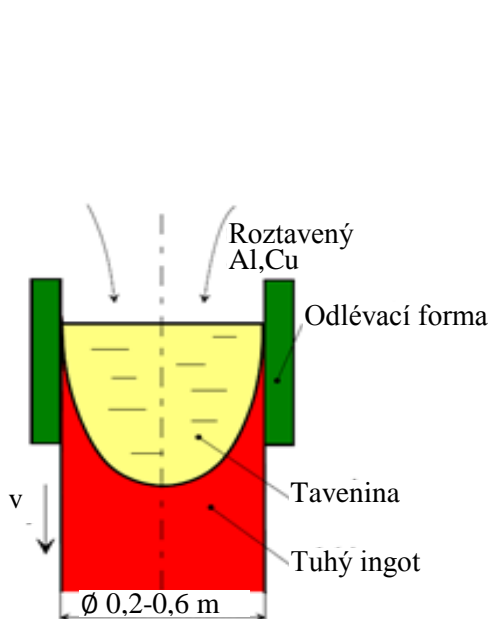


Obr. 1: Základní princip magnetohydrodynamiky kovů [1]

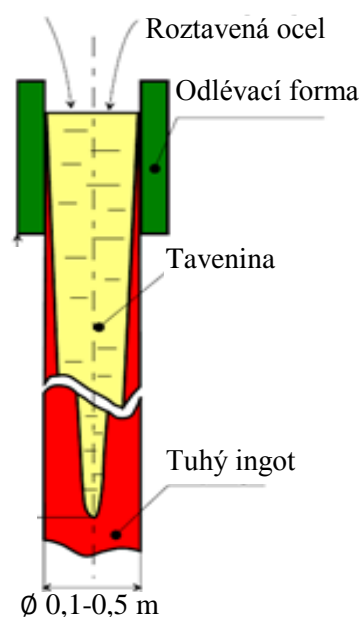
Nárůst znalostí o fyzikálních vlastnostech zpracovávaných kovů, tvorba programů využívajících složitých metod a rozvoj výpočetní techniky, umožnil optimalizaci technologických linek a také zlepšení jejich parametrů rozhodujícím způsobem. Dnes jsou technologie jako například míchání, odlévání a čerpání široce využívány při tavení oceli, hliníku a jiných technických kovů. Procesy jako levitační tavení a tavení ve studených kelímcích jsou zatím určeny zejména pro speciální použití a řadí se mezi finančně nejnáročnější technologie. [1]

## 2.1 Elektromagnetické míchání

V současné době se většina kovů odlévá kontinuálním či polokontinuálním způsobem, kdy pohyb taveniny pozitivně ovlivňuje metalurgickou strukturu odlitku. Tento způsob spočívá v tažení tuhého ingotu z chladnoucí taveniny, jejíž množství se udržuje konstantní. Pro kovy s dobrou tepelnou vodivostí jako je hliník nebo měď, je situace znázorněna na obr. 2. V tomto případě dochází k rychlejšímu tuhnutí a tavenina má přibližný tvar polokoule. V případě kovů s nízkou tepelnou vodivostí jako je například ocel, je situace na obr. 3. U těchto materiálů má tavenina tvar obráceného kužele.



Obr. 2: Odlévání hliníku a mědi [1]

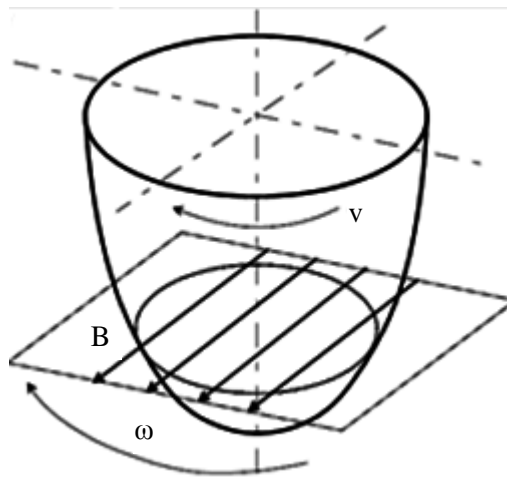


Obr. 3: Odlévání oceli [1]

Během tuhnutí kovů dochází k nepříznivým jevům, kdy mají legovací přísady tendenci vytěšňovat se z železné taveniny, což vede k nehomogenní struktuře odlitku. Dále se mohou v některých částech odlitku vytvářet různé vady. V povrchových vrstvách to mohou být

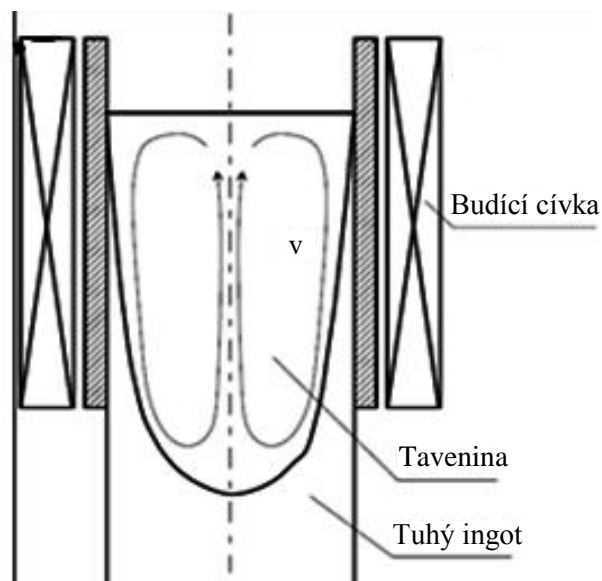


dutinky obsahující oxid uhelnatý, který se uvolňuje během procesu tavení. Vnitřní dutinky vznikají v důsledku smršťování materiálu během chladnutí. Přítomnost povrchových i vnitřních dutinek je samozřejmě nežádoucí, avšak lze ji potlačit neustálým promícháváním taveniny. Promíchávání taveniny pomocí elektromagnetického pole je realizováno několika způsoby. Nejobvyklejší je využití principu indukčního motoru, kde horizontální magnetické pole  $B$  působí jako stator asynchronního stroje a tavenina jako rotor (obr. 4). [1] [2]



Obr. 4: Míchání taveniny rotujícím magnetickým polem [2]

Jiné řešení je zobrazeno na obr. 5 a jedná se o míchání taveniny střídavým polem generovaným induktorem. Rychlost má složky ve směru  $r$  a  $z$ , a složka rychlosti je v obvodovém směru nulová. [1]

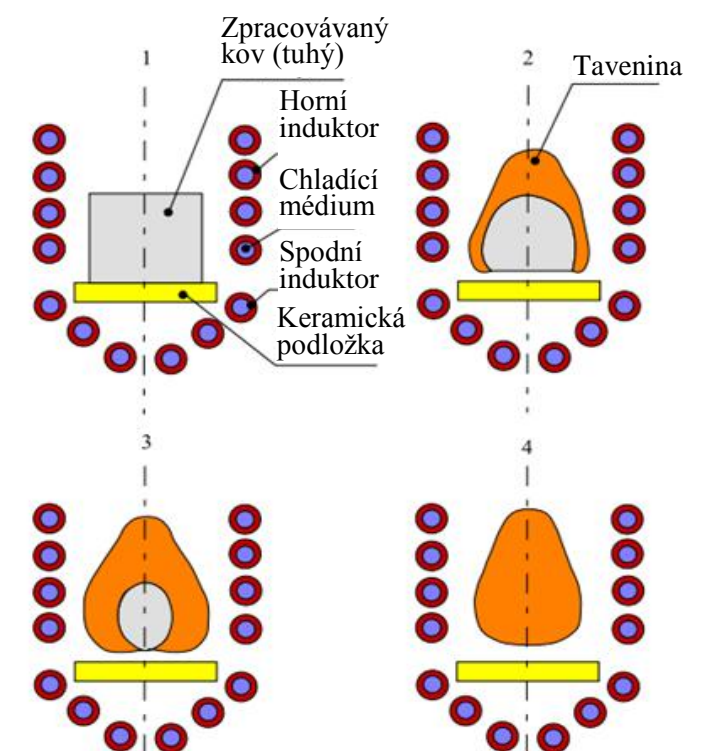


Obr. 5: Míchání taveniny induktorem protékáným střídavým proudem  $I$  o kmitočtu  $f$  [2]

## 2.2 Levitační tavení

Jedná se o technologii pro zpracování superčistých kovů nebo jejich slitin obsahujících například titan Ti, Zirkon Zr, hliník Al a některé kovy vzácných zemin. Postupy levitačního tavení a tavení ve studeném kelímku jsou si velice podobné a k jejich simulaci se přistupuje na základě podobných modelů. Tyto progresivní technologie se uplatňují spíše v menších měřítcích pro speciální aplikace např. pro letecké, kosmické a lékařské účely.

Při levitačním tavení je možné použít celou řadu konfigurací. Na obr. 6 je znázorněno uspořádání se dvěma cívkami. Spodní cívka ve tvaru kužele zajišťuje levitační efekt a horní válcová cívka zajišťuje ohřev. Jednotlivé fáze tavení jsou schematicky zakresleny v obrázku. Uspořádání cívek je osově symetrické, má však zásadní nevýhodu. Ve vnějších vrstvách taveniny působí levitační síly, zatímco v blízkosti osy jsou prakticky nulové. Z tohoto důvodu se může zpracovávat jen velmi malé množství materiálu. Jedná se o kilogramy až desítky kilogramů taveniny. Při této technologii je velmi obtížné počítačové a matematické modelování. [1]

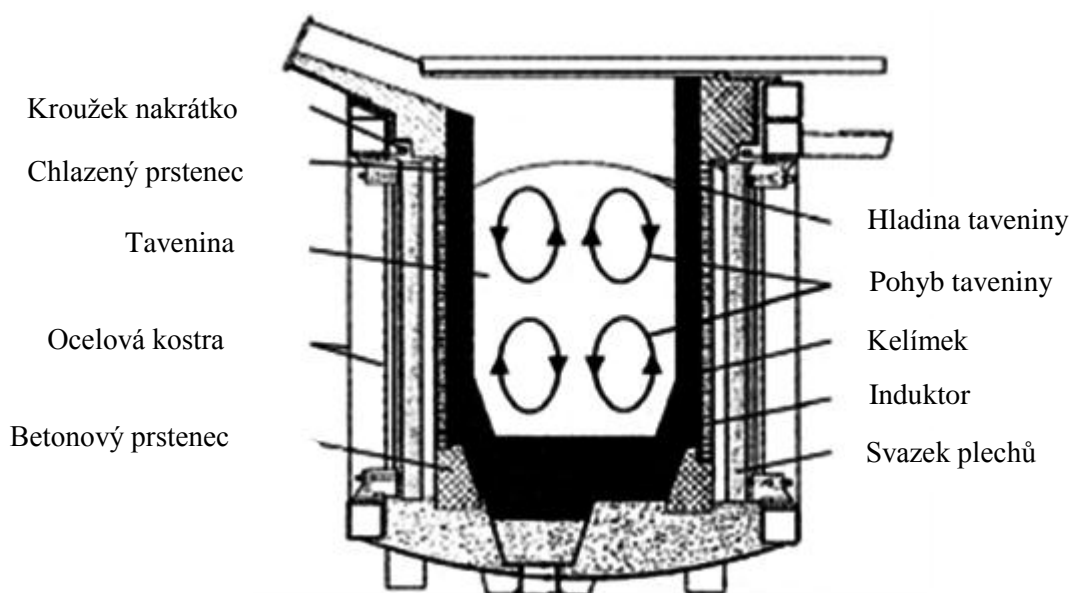


Obr. 6: Levitační tavení soustavou induktorů [1]

### 2.3 Indukční tavení v kelímkových a kanálkových pecích

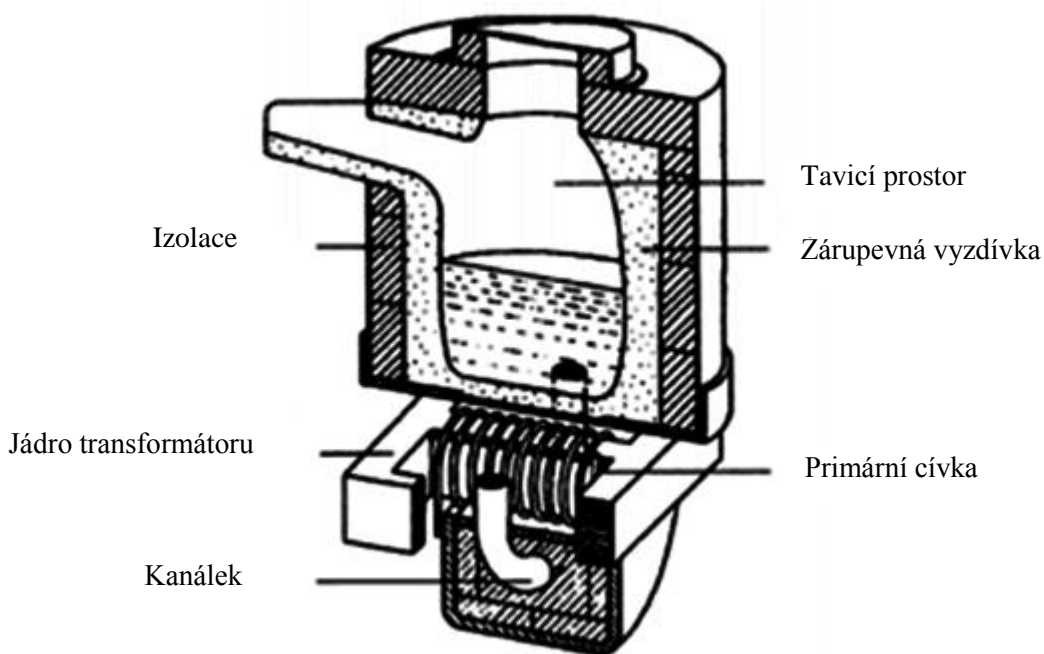
Elektrické indukční pece lze z konstrukčního hlediska rozdělit na pece kanálkové a pece kelímkové. Pece kelímkové se dále rozdělují na vysokofrekvenční, středofrekvenční a na pece na síťovou frekvenci.

Kelímkové pece vysokofrekvenční slouží jako pece laboratorní se vsázkou několika gramů až několika set gramů a používají se k tavení technických kovů. Středofrekvenční kelímkové pece se používají ve slévárnách přesného lití a indukční pece na síťovou frekvenci jsou běžné ve slévárnách litiny, kde slouží jako pece udržovací i jako pece tavicí. Na obr. 7 je zjednodušeně naznačena kelímková indukční pec. Na vnější straně keramického kelímku je induktor, který je chlazený vodou a je napájen ze zdroje střídavého proudu o frekvenci 50-1000Hz. Uvnitř kelímku dochází k proudění materiálu, které se projeví vzedmutím hladiny. Pohyb taveniny zaručuje v peci materiálovou i teplotní rovnoměrnost. [3] [4] [5]



Obr. 7: Konstrukční uspořádání kelímkové indukční pece [4]

Kanálkové elektrické indukční pece slouží jako pece udržovací a tavicí ve slévárnách litin a neželezných kovů. Jsou napájeny proudem o síťové frekvenci. Na obr. 8 je znázorněno schéma kanávkové pece pro tavení neželezných kovů. Tavenina se nachází v nístěji, která má žárupevnou vyzdívku a pod ní je uložena primární indukční cívka, navinutá na jádře z feromagnetických plechů. Pec má jeden, případně více kanálků, které ústí do taveniny. Roztavený kov uvnitř kanálků pak tvoří sekundární závit nakrátko. Vsázka je intenzivně promíchávána působením elektrodynamických sil. [3] [4] [5]



**Obr. 8: Konstrukční uspořádání kanávkové indukční pece [4]**

Uvedený výčet technologií tavení řízených elektromagnetickým polem není konečný, existuje daleko více variant, jako například tavení pomocí oblouku, nanášení kovových povlaků atd. V této kapitole byly popsány pouze nejčastěji užívané technologie. Zmíněná metoda tavení ve studeném kelímku je podrobněji rozebrána v následujících kapitolách.

### 3 Metoda tavení ve studeném kelímku

Progresivní technologie tavení ve studeném kelímku je v dnešní době používána spíše v menších měřících pro speciální aplikace. Tavení extrémně reaktivních materiálů v běžných keramických kelímcích při vysokých teplotách vede k nepřijatelnému znečištění kapalných fází. Tento fakt znemožňuje průmyslovou výrobu vysoce čistých kovů a slitin obsahujících například titan, zirkon, hliník a některé kovy vzácných zemin. Proces tavení ve studeném kelímku umožňuje roztavení těchto kovů, aniž by byly kontaminovány materiálem kelímku. [1]

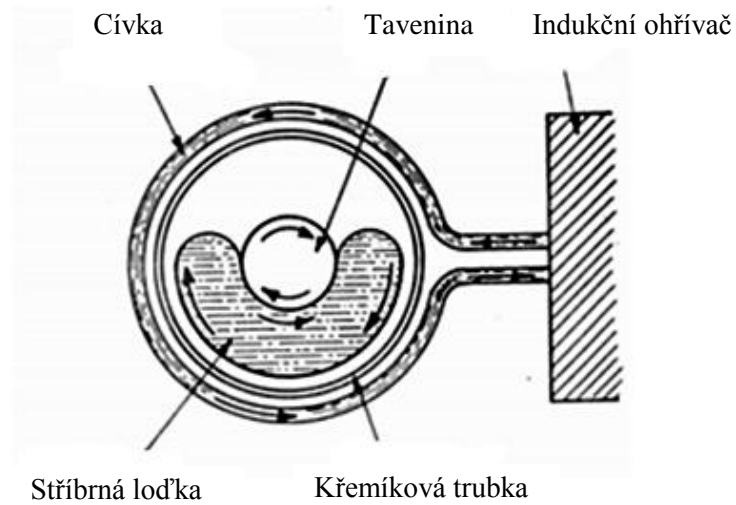
#### 3.1 Historický vývoj a přehled praktického využití metody

##### 3.1.1 Proces tavení kovů a polovodičů ve studeném kelímku

Proces tavení kovů a polovodičů ve studeném kelímku patří mezi vysoce čistý tavicí proces a je založen na vodou chlazeném kovovém kelímku, který způsobí ztuhnutí taveniny v okamžiku, kdy přijde do styku se studenými stěnami kelímku. Vytvoří se tuhá krusta, která chrání kelímek proti horké tavenině a umožňuje, aby vsázka nebyla kontaminována nečistotami. Energie potřebná k zahřátí, roztavení a přehřátí vsázky je zprostředkována pomocí elektromagnetického pole induktoru. Pro zajištění dostatečné elektromagnetické prostupnosti je kelímek dělený a sestává z mnoha segmentů, které jsou vůči sobě elektricky izolovány. Idea studeného kelímku není nová. Indukční tavení vysoce reaktivních kovů a jejich slitin bez použití keramiky ve vodou chlazené nádobě byla patentována již v roce 1931 společností Siemens a Halske v Německu. [6]

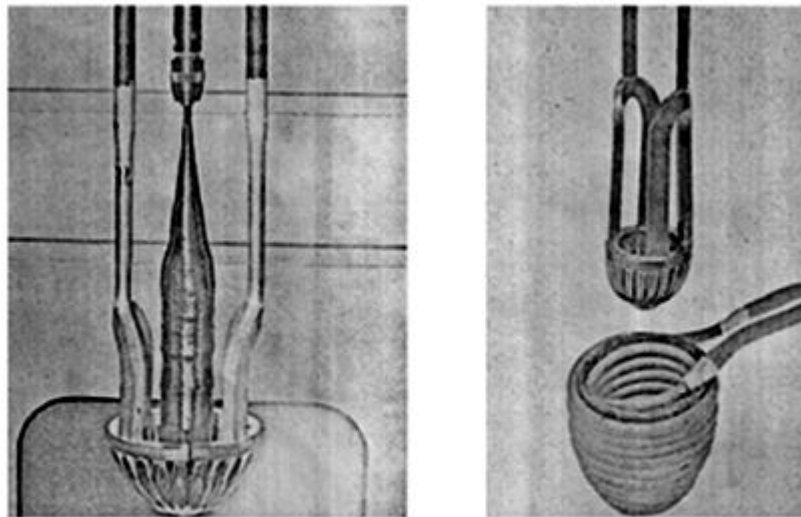
##### 3.1.2 Zpracování křemíku

O deset let později, v roce 1957 a 1961, H.F.Sterling a R.W.Warren v Anglii uvedli proces čištění křemíku pomocí indukčního ohřevu vodou chlazené „stříbrné loďky“ (obr. 9). [6]



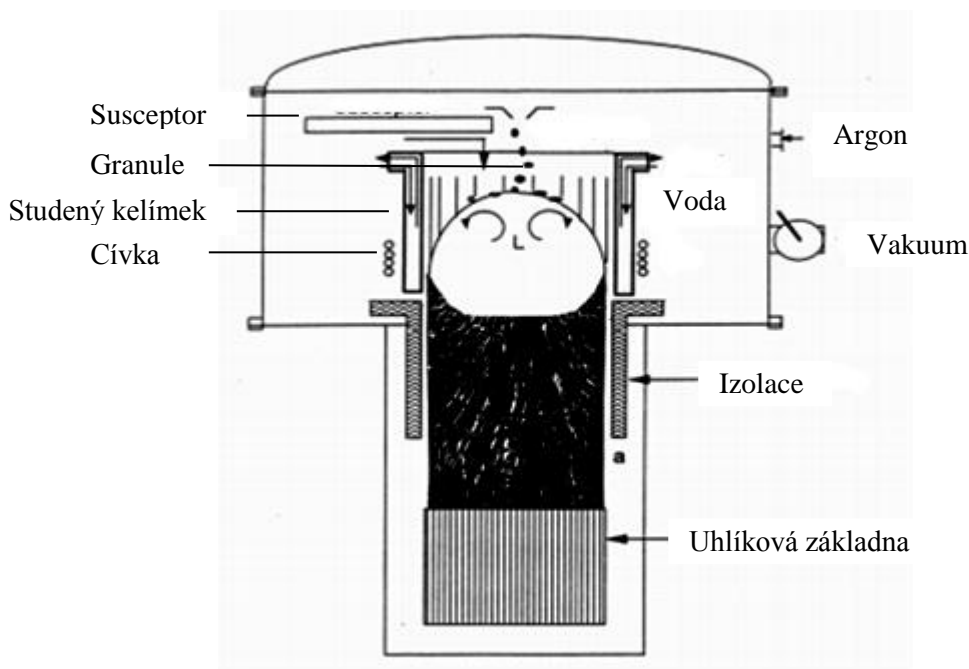
Obr. 9: Indukční ohřev vodou chlazené „stříbrné loďky“ [6]

V Belgii roku 1961 A.Berghezan se Simonsem taktéž popsali horizontální indukční tavení žáruvzdorných kovů a polovodičových materiálů ve vodou chlazených kovových loďkách (obr. 10). [6]



Obr. 10: Horizontální indukční tavení [6]

V roce 1963 Sterling a Warren znovu informovali o růstu vysoce čistých křemíkových krystalů ve vodou chlazeném studeném kelímku. Použili Czochralského metodu, která je celosvětově známá v křemíkovém průmyslu. V tomto případě studený kovový kelímek zabraňuje kontaminaci s vnější nádobou (obr. 11). Bohužel všechny tyto experimenty byly neúspěšné a zmíněné metody nebyly nasazeny pro průmyslové využití. [6]



**Obr. 11: Kontinuální lití křemíku ve studeném kelímku [6]**

V následujících letech zkoumalo tuto technologii mnoho jiných expertů. V roce 1969 jeden z průkopníků J.Rebouch ve Francii získal americký patent na zpracování velkých multi-krystalických křemíkových kvádrů pro solární panely pomocí indukčního studeného kelímku. Roku 1985 navrhl T.F.Ciszek v USA použití techniky studeného kelímku pro přetavení a pro svislé kontinuální lití křemíku v potřebné čistotě pro solární články v kelímku s otevřeným dnem. Odlil ingot o průřezu 25x25 mm s délkou 170mm. [6]

Od roku 1990 skupina MADYLAM pod vedením M.Garniera ve Francii plně převzala tuto inovativní techniku. Bylo provedeno několik modifikací této metody, které braly v úvahu fyzikální vlastnosti křemíku, zvláště pak jeho elektrickou vodivost silně závislou na teplotě a na teplotní roztažnosti během tuhnutí. Kelímek je dělený nikoliv ve své horní části, ale ve spodní. Na počátku procesu jsou špatně vodivé tuhé křemíkové granule předehřívány pomocí uhlíkového susceptoru umístěného nad kelímek, zatímco stupeň ochlazení ztuhlého

materiálu je řízen pomocným uhlíkovým topným tělesem přímo pod kelímek. Tímto způsobem byly připraveny ingoty až do rozměru 130x130mm pro použití v solárních článkách. Podobné výzkumy nebyly prováděny pouze v USA a v Evropě, ale také v Japonsku, kde K.Knaeko a další v roce 1990 zveřejnili výsledky svého výzkumu indukčního tavení a lití křemíkového materiálu pro solární články. V současnosti metoda kontinuálního lití ingotů multikrystalického křemíku nehraje hlavní roli v průmyslové výrobě křemíku v čistotě pro fotovoltaické články. [6]

### **3.1.3 Zpracování kovů**

Roku 1961 G.H.Schippereit a další představili pec se studeným kelímek pro indukční tavení reaktivních kovů. Složitost fyzikálních interakcí mezi elektromagnetickými, tepelnými a kapalinnými toky v tavenině společně s vytvářením tuhé krusty mezi stěnami studeného kelímku a taveninou umožňovala v počátečních fázích pouze empirické zkoumání této metody. Intenzivní experimentální výzkumy v této oblasti probíhaly od počátku 80. let minulého století, zvláště ve výzkumných institutech v Rusku, Francii a Japonsku.

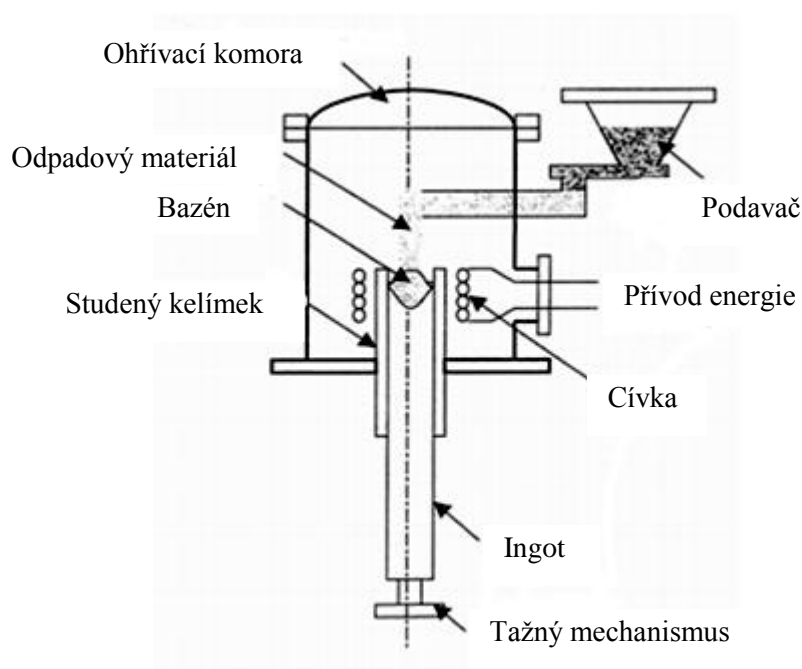
V roce 1982 D.Delage a v roce 1988 A.Gagnoud a další publikovali významné experimentální výsledky. V téže době se společnost ALD (výrobce moderních tavicích jednotek) zaměřila na vývoj výrobních procesů pro TiAl součástí pro automobilový průmysl.

Kromě těchto teoretických výzkumů byly v Hanoveru provedeny i testy tavení a odlévání TiAl výfukových ventilů pro automobily. Od roku 1990 je indukční tavení a lití pomocí studeného kelímku široce průmyslově používáno. Intermetalické směsi v gama-fázi TiAl vykazují výbornou teplotní odolnost, která je předurčuje k použití v automobilovém průmyslu jako materiály ventilů. Výroba TiAl ventilů může posloužit jako praktický příklad úspěšné sériové aplikace tavení ve studeném kelímku. Proces založený na tavení ve studeném kelímku s odléváním do temperované rotující formy slouží pro výrobu vysokého počtu dílů při nízkých nákladech. Velkou výhodou je sloučení kroků tavení, legování, přehřívání a odlévání do jediného procesu.

Malé množství vstupních surovin vede ke snížení odpadu vznikajícího během procesu. Tyto charakteristické vlastnosti metody tavení ve studeném kelímku vedou ke značným finančním úsporám. V roce 2005 A.Umbrashko zveřejnil výsledky studií kapalinných toků ve studeném kelímku za použití metody LES (Large Eddy Simulation). [6]



Metoda kontinuálního lití ze studeného kelímku je využívána nejen pro přípravu polykrystalického křemíku, ale také pro recyklaci TiAl odpadu, vznikajícího z různých zdrojů. Tento proces byl pro průmyslové nasazení vyvinut v roce 1980 ve spolupráci společností CEZUS ve Francii a MADYLAM. Tato technologie, někdy označována jako 4C proces, spojuje kontinuální indukční tavení podávaných materiálů ve vodou chlazeném měděném kelímku s následným tuhnutím taveniny, způsobeném postupným odebíráním ztuhlého ingotu (obr. 12). Dělený kelímek slouží jako nádoba pro taveninu a zároveň jako forma pro odlévání. Pro určení pracovních podmínek byla řešena závislost mezi 3D magnetických polem, kapalinným tokem v tavenině a teplotou užitím experimentálního a numerického přístupu. [6]



Obr. 12: Kontinuální lití ve studeném kelímku, schematicky [6]

Další aplikací 4C procesu v metalurgii je při výrobě oceli. V roce 1995 byl zahájen japonský národní projekt zahrnující 9 japonských a 2 evropské společnosti, jehož cílem bylo zvýšit kvalitu a produkci ocelí na odlitky díky kontinuálnímu lití ze studeného kelímku. [6]

### 3.1.4 Zpracování nebezpečného odpadu

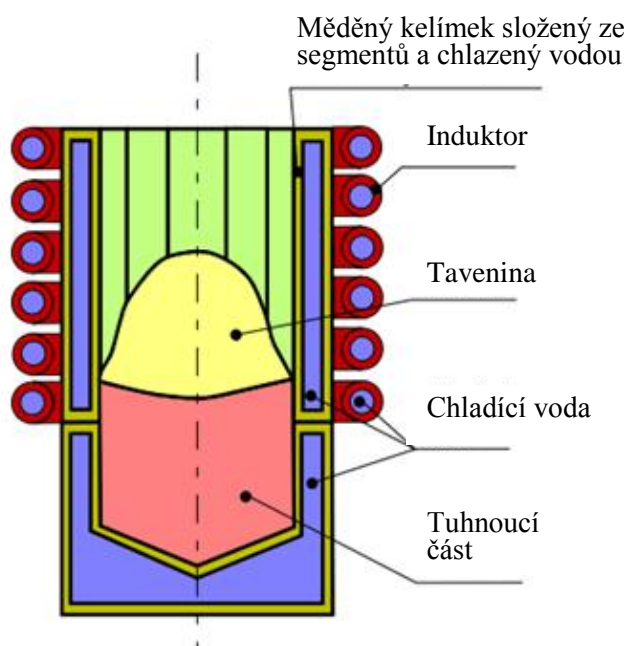
Již od roku 1999 bylo nedaleko Moskvy v továrně Radon využíváno zařízení se třemi studenými kelímky o průměru 45 cm pro zpracování nebezpečného odpadu. V roce 2001 výzkumníci z Národní laboratoře v Idahu za spolupráce ruských vědců navrhli také testovací zařízení technologie ISM pro zpracování radioaktivního odpadu (průměr kelímku 25 - 45 cm).

V roce 2009 bylo ve Francii instalováno další testovací zařízení s průměrem kelímku 65 cm. [7]

### 3.2 Princip tavení ve studeném kelímku

Metodou tavení materiálů ve studeném kelímku se zabývá řada pracovišť po celém světě. Studený kelímek je zařízení o průměru až několika desítek centimetrů, ve kterém lze tavit materiály v kilogramových množstvích. Mezi hlavní přednosti metody indukčního ohřevu patří, že se tavený materiál nedotýká povrchu nádoby a nedojde tak k jeho znečištění, a zároveň možnost dosahovat procesních teplot až 3000 °C. [8]

ISM (induction skull melting) je metoda pro tavení kovů (obr. 13) v dělené, vodou chlazené měděné nádobě umístěné uvnitř indukčního vinutí ve vakuu nebo řízené atmosféře. Proces je prováděn metodou „kov na kov“ bez jakéhokoliv žárupevného obložení. Měděný kelímek je tvořen vodou chlazenými segmenty nebo „prsty“. Magnetické pole prochází kelímkem a vede k ohřevu kovové vsázky až k jejímu roztavení. Toto pole zároveň intenzivně promíchává taveninu. Na styku mezi vsázkou a kelímkem se vytvoří tenká vrstva pevného kovu. Mezní vrstva taveniny s nízkou energií včetně tuhé skořepiny a rozhraní mezi skořepinou a kelímkem slouží jako tepelný izolant, čímž je snížen přestup tepla z horké taveniny do studeného kelímku. [9] [10]



Obr. 13: Schéma indukčního tavení ve studeném kelímku [1]

Pokud jsou kelímek, cívka, frekvence a zdroj energie správně zkonstruovány a nastaveny, jsou stěny roztavené kovové lázně vtlačovány ke středu kelímku, dál od stěn kelímku. Stěny taveniny jsou tedy „podpírány“ magnetickým polem. Chybějící fyzický kontakt taveniny a stěn kelímku zabraňuje vzniku zkratu a dále snižuje tepelné ztráty do kelímku. Tento proces je většinou používán při odlévání horem nebo spodem, ale lze jej využít i při výrobě ingotů. V tomto případě je používán kelímek s otevřeným dnem a spodem taženou spouštěcí zátkou, která formuje ingot, zatímco je horem plněn vsázkový materiál. [9]

Energie je dodávána z indukčního zdroje napětí, který je speciálně navržen pro správnou dodávku energie a frekvence pro proces ISM. Energie je vedena vakuovou komorou prostřednictvím hermetického, vodou chlazeného koaxiálního rotačního vedení do tavné cívky. [9]

### 3.2.1 Indukční ohřev

Indukční ohřev se používá u elektricky vodivých materiálů, které jsou umístěny ve střídavém magnetickém poli a vlivem indukce vířivých proudů dochází k ohřevu materiálu. Základy teorie indukčního ohřevu založeného na principu elektrodynamiky popisují Maxwellovy rovnice. [11]

#### 3.2.1.1 Maxwellovy rovnice

Maxwellovy rovnice popisují elektromagnetické pole v každém bodě prostoru. První rovnice (3.1) vyjadřuje Ampérův zákon celkového proudu, druhá rovnice (3.2) vychází z Faradayova indukčního zákona, třetí rovnici (3.3) popisuje Gaussova věta elektrostatiky a čtvrtá rovnice (3.4) je v podstatě zákon spojitosti siločar magnetické indukce. Maxwellovy rovnice bývají vyjádřeny v integrálním tvaru. [3] [12]

$$\oint_c \mathbf{H} dl = I + \frac{d\Psi}{dt} \quad , \quad (3.1)$$

$$\oint_c \mathbf{E} dl = - \frac{d\Phi}{dt} \quad , \quad (3.2)$$

$$\oint_s \mathbf{D} ds = Q \quad , \quad (3.3)$$

$$\oint_s \mathbf{B} ds = 0 \quad . \quad (3.4)$$

Tyto rovnice mají pro popis elektromagnetického pole obecnou platnost a při hledání prostorového nebo časového rozložení intenzit či indukcí pole je velmi obtížná jejich aplikace. Pro zjednodušení je nutné převedení integrálních rovnic na diferenciální tvar použitím Stokesovy a Gauss-Ostrogradského věty. Stokesova věta popisuje integrál daného vektoru po uzavřené křivce, který je roven plošnému integrálu z rotace uvažovaného vektoru. Gauss-Ostrogradského věta vychází z toho, že plošný integrál daného vektoru přes uzavřenou plochu je roven objemovému integrálu z divergence daného vektoru. [3] [12]

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad , \quad (3.5)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad , \quad (3.6)$$

$$\operatorname{div} \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} = \rho \quad , \quad (3.7)$$

$$\operatorname{div} \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = 0 \quad , \quad (3.8)$$

kde  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  [H/m]

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9}$$
 [F/m]

Z Maxwellových rovnic lze odvodit obecné rovnice šíření elektromagnetického vlnění, vztah (3.9) popisuje tvar magnetické složky a (3.10) tvar elektrické složky, v prostředí s konstantními  $\gamma, \varepsilon_r, \mu_r$ . Převážně se ovšem vyskytuje prostředí vodivé, kde lze zanedbat  $\varepsilon_r$ . Pro nevodivá prostředí lze zanedbat  $\gamma$ . [3] [12]

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad , \quad (3.9)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \operatorname{grad} \frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad , \quad (3.10)$$

kde  $\nabla^2 \mathbf{H}$  představuje Laplaceův diferenční operátor vektoru  $\mathbf{H}$ .

Úpravou vlnových rovnic získáme pro vodivé prostředí [12]:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad , \quad (3.11)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad . \quad (3.12)$$

Pro nevodivé prostředí přejdou rovnice obdobně [12]:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad , \quad (3.13)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad . \quad (3.14)$$

Pokud rovnice pro nevodivá prostředí upravíme na tvar [12]:

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r} \nabla^2 \mathbf{H} = \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad , \quad (3.15)$$

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r} \nabla^2 \mathbf{E} = \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad . \quad (3.16)$$

Podle definice vlnové rovnice v trojrozměrném prostoru je součinitel u  $\nabla^2 E$  a  $\nabla^2 H$  roven  $v^2$ . Poté platí vztah pro rychlost šíření vlnění v daném prostředí [12]:

$$v = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r}} \quad [m/s] \quad . \quad (3.17)$$

### 3.2.1.2 Zářivý Poyntingův vektor

Poyntingův vektor  $\mathbf{S}$  udává směr a hustotu toku elektromagnetické energie v prostoru. Je velmi výhodnou pomůckou pro výpočet indukčního ohřevu, ztrát ve vinutí elektrických strojů apod. [13] [3]

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad [W/m^2] \quad . \quad (3.18)$$

Elektromagnetické pole je svázáno s tokem elektromagnetické energie v prostoru. Množství energie, které proteče za 1 sekundu plochou  $1 \text{ m}^2$ , kolmou ke směru šíření, udává výraz (3.17). Tok energie prochází ve směru vektoru  $\mathbf{S}$ . [13] [3]

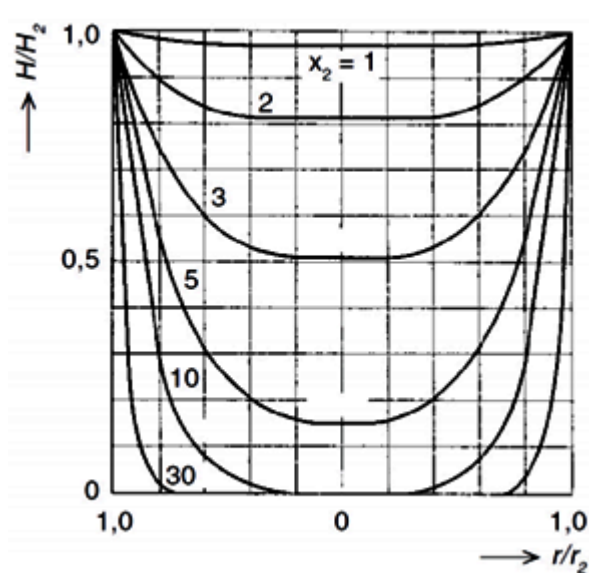
### 3.2.1.3 Hloubka vniku

Hloubka vniku  $a$  je parametr, který udává, v jaké hloubce klesne hustota proudu na hodnotu  $1/e = 0,368$ , kde  $e$  je Eulerovo číslo. [11]

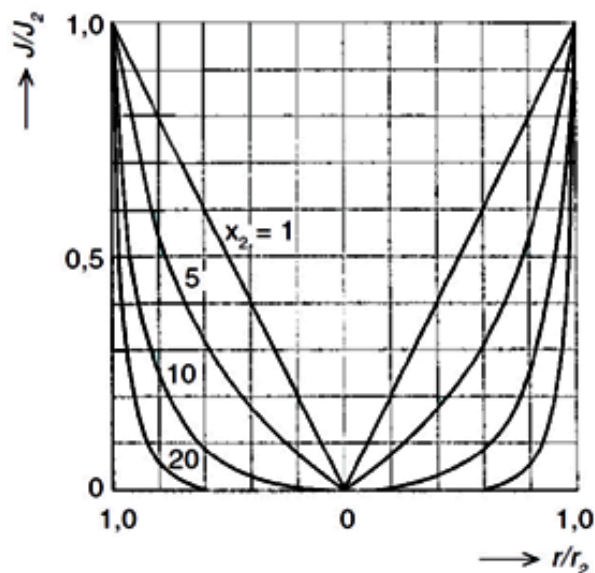
$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_r \mu_0 \gamma}} \quad [m] \quad . \quad (3.19)$$

Na diagramu (obr. 14) je zobrazeno rozložení intenzity magnetického pole  $H/H_2$  válcové vsázky, na diagramu (obr. 15) je naznačeno rozložení hustoty proudu  $J/J_2$  v závislosti na argumentu  $x_2$ . Argument je definován vztahem [11]:

$$x_2 = \frac{r_2}{a} \sqrt{2} \quad . \quad (3.20)$$



Obr. 14: Rozložení intenzity magnetického pole ve válcové vsázce v závislosti na parametru  $x_2$  [11]



Obr. 15: Rozložení proudové hustoty magnetického pole ve válcové vsázce v závislosti na parametru  $x_2$  [11]

Při vyšším kmitočtu je hloubka vniku menší a argument  $x_2$  vyšší. Dle obrázků je patrné, že při nízkém kmitočtu je intenzita magnetického pole  $H_2$  v celém průměru vsázky téměř konstantní. Hustota proudu  $J_2$  se téměř lineárně zvyšuje s rostoucím poloměrem. Naopak při vyšší frekvenci pro vysoké hodnoty parametru  $x_2$  jsou průběhy veličin  $H_2$  a  $J_2$  dány exponenciální křivkou. [11]

Pro nízký kmitočet se vsázka rovnoměrně prohřeje, pro vysoký kmitočet se ohřeje pouze tenká povrchová vrstva. Z ekonomického hlediska je zapotřebí volit takové parametry, aby průměr vsázky byl přibližně 3,5krát větší než hloubka vniku. Tím by došlo ve velmi krátkém časovém úseku téměř k rovnoměrnému prohřátí celé vsázky. [11] [14]

Tab. 1 – Účinnost indukčního ohřevu válcového tělesa v závislosti na poměru  $d/a$  [14]

$d/a$	8	6	4	2	1	0,6	0,4
účinnost [%]	95	85	65	30	10	4	1

Tab. 2 – Orientační hodnoty  $a$  u oceli a mědi v závislosti na kmitočtu [14]

materiál	rezistivita [ $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}$ ]	poměrná permeabilita	hloubka vniku $a$ [mm]						
			50Hz	500Hz	5kHz	50kHz	0,5MHz	5MHz	50MHz
ocel 20°C	0,16	20	6	2	0,6	0,2	0,06	0,02	0,006
ocel 800°C	1,2	1	75	14	7,5	2,4	0,75	0,24	0,075
měď 20°C	0,02	1	10	3	1	0,3	0,1	0,03	0,01
měď 800°C	0,7	1	18	5,8	1,8	0,6	0,18	0,06	0,18

Důležitou součástí celého zařízení pro indukční ohřev je induktor, který je obvykle zhotoven z dutého měděného vodiče protékaného chladícím médiem. Kapalina odvádí elektrické ztráty v cívce a teplo, které prochází z taveniny stěnou kelímku do induktoru. Rychlost chladícího média je přibližně 2 m/s a dosahuje maximální teploty 60°C. Při vyšší teplotě by se voda začala vařit a vzniklá pára by zabránila průtoku kapaliny a během krátké doby by došlo ke zničení cívky. [14] [15] [16] [17]

Na vhodném tvaru cívky závisí účinnost indukčního ohřevu a je zapotřebí, aby byl induktor přizpůsoben tvaru ohřivaného materiálu, a aby byl navržen pro maximalizaci účinnosti přenosu energie ze zdroje do taveniny. Provedení indukční cívky je poměrně složité, závisí na mnoha parametrech např. na rozměrech kelímku, elektrické vodivosti, objemu vsázky, na teplotním profilu taveného materiálu apod. Dle výzkumu bylo ověřeno, že pro optimální podmínky šíření energie do taveniny by výška cívky měla být shodná s výškou vsázky. Geometrické uspořádání induktoru může být válcové, ploché nebo lineární a dle vztahu pro válcová tělesa lze vypočítat přibližnou účinnost ohřevu. [14]

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{D^2}{d^2}} \left(1 + 6,25 \frac{a^2}{d^2}\right) \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu \rho_2}} \quad (3.21)$$

Člen  $(1 + 6,25 \frac{a^2}{d^2})$  je zapotřebí volit co nejmenší. Z výpočtu lze dosáhnout hodnoty 1,1, proto je důležité volit frekvenci dle požadavku na velikost poměru  $a/d$  [14]:

$$\frac{a}{d} \leq \frac{1}{\sqrt{62,5}} \approx \frac{1}{8} \quad (3.22)$$

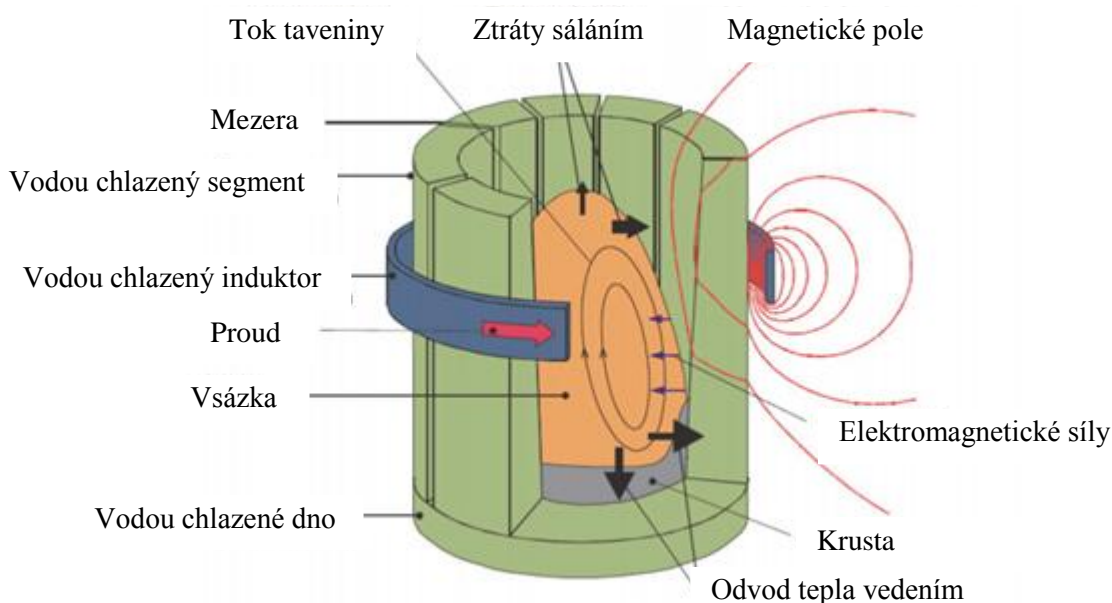
Minimální frekvence dle vztahu (3.22):

$$f_{min} = 16 \cdot 10^6 \frac{\rho}{\mu d^2} \quad [\text{Hz}] \quad . \quad (3.23)$$

Elektrická účinnost tavení ve studeném kelímku u kovů je nejvýše 50%, naopak u elektricky nevodivých materiálů je podstatně vyšší a dosahuje až 90%. Vysoké procento účinnosti zajišťuje velký rozdíl elektrické vodivosti mezi taveninou a mědí, proto se studený kelímek uplatňuje více při tavení nevodivých materiálů. Účinnost studeného kelímku je z důvodu vyšších tepelných ztrát přibližně dvakrát nižší než u klasických indukčních pecí s keramickým kelímkem, proto je využíván pro speciální aplikace, pro zajištění vysoké čistoty konečného materiálu. [8] [15] [18] [17]

### 3.2.2 Princip indukčního ohřevu

Princip indukčního ohřevu lze zjednodušeně popsat z obr. 16. Kelímek se sestává ze vzájemně izolovaných měděných segmentů. Segmenty jsou chlazené vodou a do mezer mezi nimi vstupuje tok energie elektromagnetického pole do taveniny. Induktorem z dutého měděného vodiče chlazeného též vodou, protéká střídavý proud a vyzařuje elektromagnetické vlnění. Dopadem elektromagnetických vln na stěnu vsázky vzniká teplo přímo ve vsázce. Část vlnění se při dopadu na povrch vsázky odrazí a vrací zpět, druhá část prochází stěnou, ve které následně vyvolá vířivé proudy. Elektrony se pohybují v krátkých volných drahách se značnou kinetickou rychlostí ve směru intenzity elektrického pole. Při nárazu elektronu do atomu vodiče dochází k předání kinetické energie a tím ke zvýšení teploty materiálu. [13] [3]



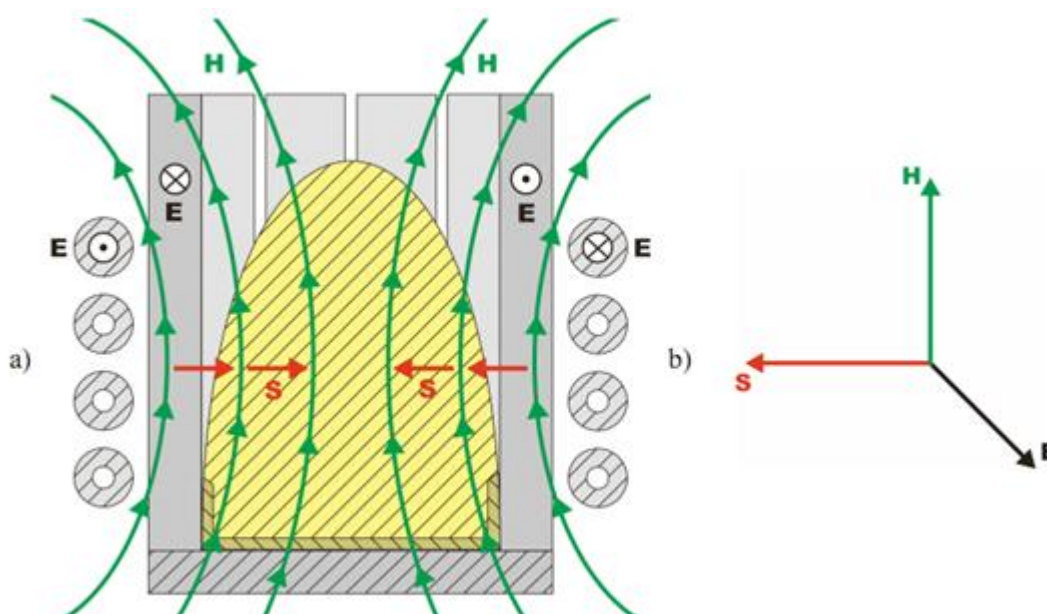
Obr. 16: Princip indukčního ohřevu [19]



Zjednodušeně lze indukční ohřev přirovnat k transformátoru, kde primární vinutí tvoří cívka a sekundární vinutí představuje vsázka nakrátko.

### 3.2.3 Přenos elektromagnetické energie

Pomocí Poyntingova (zářivého) vektoru lze vysvětlit tok energie elektromagnetického pole z cívky do vsázky. Přenos energie (obr. 17) probíhá mezerami segmentů. Poyntingův vektor  $S$  udává výkon vycházející z objemu na jednotku plochy. Je dán složkami intenzit elektrického pole  $E$  a magnetického pole  $H$ , které jsou v prostoru navzájem kolmé. Poyntingův vektor je určen vektorovým součinem fázorů  $E$  a  $H$ . Dle obr. 18 je Poyntingův vektor kolmý na rovinu v níž  $E$  a  $H$  leží. Mezerou mezi chlazenými segmenty se šíří tok elektromagnetické energie a následně vstupuje do vsázky v radiálním směru. [13]



Obr. 17: Princip přenosu energie ve studeném kelímku [13]

Obr. 18: Orientace vektorů [13]

### 3.3 Konstrukční provedení kelímku

V indukčních pecích se standardním vodivým kelímek dochází vlivem elektromagnetické energie ke vzniku naindukovaného tepla a tím i přes intenzivní chlazení k zahřátí kelímku. Pro ISM metodu je toto nežádoucí. Pro zajištění vysoké čistoty materiálu je zapotřebí vytvořit velmi tenkou krustu na stěnách kelímku, aby kelímek po celou dobu tavení zůstal studený.

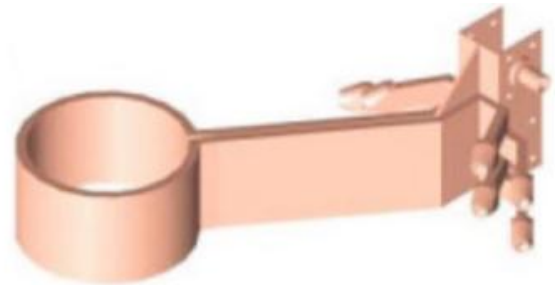
Pro studený kelímek existují dvě varianty konstrukčního provedení. Prvním případem je kelímek tvořený vodou chlazenou cívkou, která představuje přímo stěnu kelímku. Druhou možností je kelímek z jednotlivých kovových segmentů, které jsou též intenzivně chlazené vodou. Cívka je umístěna vně kelímku jako u indukčních kelímkových pecí. [17] [8]

### 3.3.1 Kelímek jako cívka

Kelímek tvoří jednozávitová cívka, případně více těchto segmentů nad sebou a využívá se převážně pro tavení elektricky špatně vodivých materiálů. Příkladem materiálů pro tavení tímto způsobem jsou oxidy, keramika a především sklo, které mají tavicí teplotu vyšší než 2000 °C. K natavování dochází od jádra materiálu a na povrchu zůstává krusta vsázkového materiálu. Ten je ohraničen závitem chlazené cívky. [17] [8] [20]



Obr. 19: Reálný kelímek s integrovaným induktorem [21]



Obr. 20: Kelímek s integrovaným induktorem [22]

Výhodou u tohoto způsobu je vyšší elektrická účinnost a nižší ztráty. Ze vztahu pro určení elektrické účinnosti indukčních pecí je vyšší účinnost patrná, neboť neuvažujeme člen  $R_3$ . Odpadá problém s naindukovanými proudy v kelímku a nevznikají ztráty v mědi. V případě použití kelímku z jednotlivých segmentů je účinnost přibližně 33 %, u cívky, která tvoří přímo stěnu kelímku, je možné očekávat účinnost max. 50 %. [8] [20]

Vztah pro výpočet elektrické účinnosti indukčních pecí:

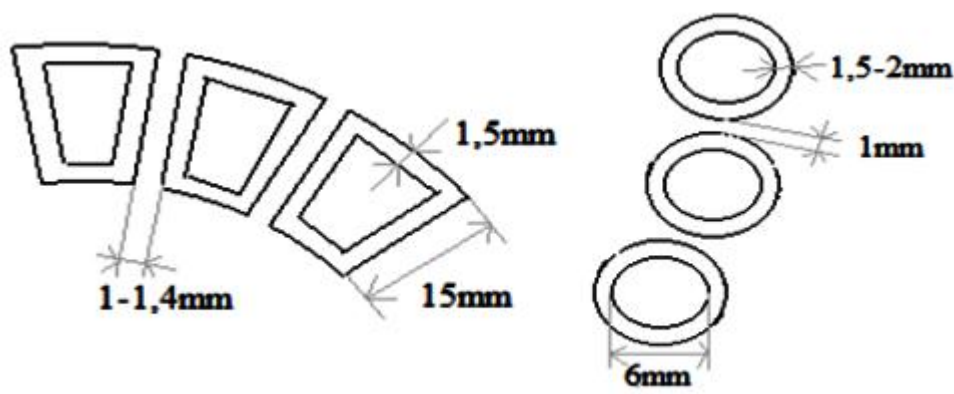
$$\eta = \frac{R_2}{R_2 + R_1 + R_3} \quad , \quad (3.24)$$

kde  $R_1$  rezistivita materiálu induktoru,  $R_2$  rezistivita vsázky,  $R_3$  rezistivita materiálu kelímku.

Nevýhoda je složitější konstrukce induktoru, který je zapotřebí intenzivně ochlazovat z důvodu přímého styku s taveninou. Při dokonalé izolaci se napájí napětím do 1 kV, aby nevznikl zkrat mezi přívody cívky. V praxi se setkáváme spíše s druhou variantou konstrukce. [8] [20]

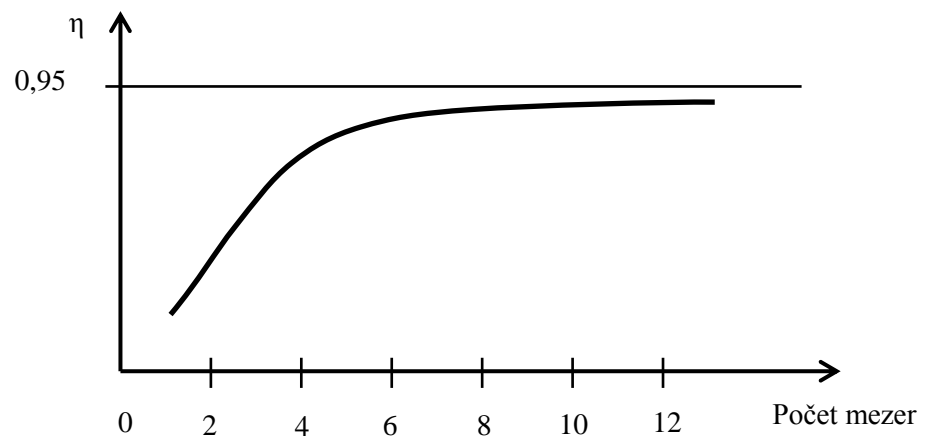
### 3.3.2 Kelímek tvořený segmenty

Konstrukce sestává z kelímku a médiem chlazeného induktoru. Kelímek je pro zvýšení účinnosti tvořen ze segmentů nebo z dutých trubek. Tvary těchto segmentů jsou zobrazeny na obr. 21. Pro konstrukci kelímku se využívají nemagnetické kovy. Příkladem jsou nerezová ocel, hliník a nejčastěji měď z důvodu vysoké elektrické vodivosti. [17] [8] [20]



Obr. 21: Tvary segmentů studeného kelímku [20]

Rozměry trubek, segmentů a mezer mezi nimi jsou dle provedených experimentů limitovány. Mezi bloky je zapotřebí mít minimální mezeru pro udržení taveniny uvnitř kelímku. Zároveň je třeba, aby vzdálenost byla bezpečná pro napětí mezi stěnami segmentu, které klesá s rostoucí teplotou a množstvím nečistot. Mezera mezi bloky se zpravidla volí 1 mm, protože dosažení menších hodnot je technicky obtížné. U kruhového průřezu je hodnota 1 mm limitní, u ostatních segmentů je možno mezeru zvýšit až na 1,4 mm. Z mechanického hlediska se tloušťka stěn volí 1,5 mm a šířka segmentu nad 5mm z důvodu tlaku chladicího média. Při těchto rozměrech je zároveň zajištěno i dostatečné chlazení. V praxi se běžně používají kelímky s několika desítkami segmentů. Dle grafu se účinnost ustálí přibližně od 8 segmentů (obr. 22). Konstrukční uspořádání kelímku je uvedeno na obr. 23. [17] [8] [20]



Obr. 22: Graf závislosti účinnosti na počtu segmentů [20]



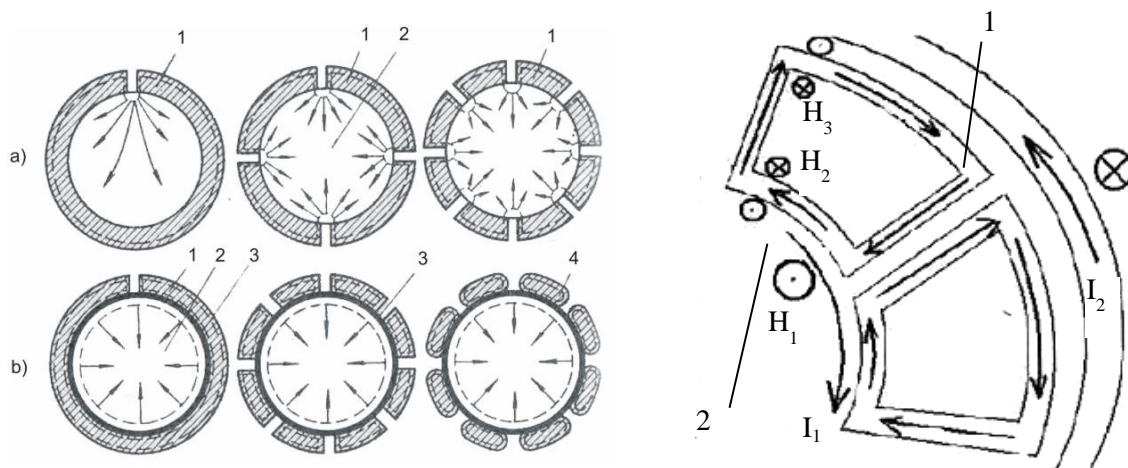
Obr. 23: Klasický studený kelímek tvořený segmenty [18]

Pro určení počtu segmentů pak lze vycházet ze vztahu [17]:

$$n \approx \frac{\pi d}{b+1} < \frac{\pi d}{6} \quad . \quad (3.25)$$

Při tavení kovů u tohoto provedení kelímku dochází ke snížení tepelné účinnosti, jelikož mezi vnitřním povrchem kelímku a taveninou vzniká elektrický kontakt. Dle obr. 24 je patrné, že

magnetické pole prochází mezerami segmentů a budí elektrický proud, který se uzavírá přes obvod segmentů a mezery, kterých se dotýká vsázka. Pro tavení kovů ve studeném kelímku je nejvýhodnější použití izolantu, neboť pronikání magnetického pole do taveniny je rovnoměrné a je zvýšena účinnost zařízení. Obr. 24b zobrazuje konstrukci s tenkou izolační vrstvou  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nebo  $\text{ZrO}_2$ , kde se proud uzavírá taveninou a v jednotlivých segmentech. Díky odizolování se docílí stejné intenzity ve všech bodech na povrchu vsázky a tím i k rovnoměrnému ohřevu. [17] [8] [20]



Obr. 24: Pronikání magnetického pole segmenty [17]

a) bez izolace, b) s izolací, 1 – segment, 2 – tavenina, 3 – izolační vrstva

Při tavení materiálů se špatnou elektrickou vodivostí jako jsou oxidy kovů a skla se dosahuje účinnosti až 90%. Proces tavení je obdobný jako u tavení vodivých materiálů, avšak nastávají zde potíže s nastartováním tavby. Nevodivé materiály nelze indukčně ohřívat z pokojové teploty a je zapotřebí v závislosti na daném materiálu zvolit řešení pro uskutečnění tavení. První možností je přidání startovacího materiálu, od kterého se následně začne tavit i vsázka. Aby nedošlo k roztavení veškeré vsázky, je zapotřebí regulovat tavbu snižováním výkonu a masivním chlazením kelímku. Startovací materiál je zapotřebí volit dle fyzikálních a chemických vlastností pro zabránění kontaminace ve vsázce. Ideálním příkladem je metalický zirkon. V určitých případech je použit i materiál, který může negativně ovlivnit vsázku a poté je zapotřebí vkládat minimální množství startovacího materiálu, případně ho po nastartování tavby odstranit. Druhou možností pro nastartování tavby je ohřát vsázku pomocí jiného zdroje tepla, například plynového hořáku, elektrického oblouku či laserového paprsku na takovou teplotu, při které se zvýší elektrická vodivost vsázky na potřebnou hodnotu pro její tavení elektromagnetickou indukci. [17] [8] [20]

## 4 Zhodnocení procesu tavby metodou studeného kelímku

Metoda tavení ve studeném kelímku je relativně mladá a podléhá neustálému vývoji a zdokonalování. Přes některé nesporné výhody (dosahování velmi vysokých teplot, vysoké čistoty výsledného produktu, atd.) existují stále i určitá úskalí, s nimiž se potýkají v řadě výzkumných pracovišť po celém světě (Rusko, Německo, USA, Japonsko, Čína a další). Vystávají zde především otázky technické, energetické, ekologické a ekonomické povahy. Hodnocení technologie ISM je tedy možno provádět dle uvedených hledisek viz obr. 25.

V této kapitole jsou v jednotlivých bodech rozebrány přednosti a nevýhody tavení materiálů ve studeném kelímku z dostupné literatury [1] [23] [20] [8] [24] [16] [17] [15] [25] [26] [10].

### 4.1 Výhody ISM

- Klíčovou předností tohoto způsobu tavení je možnost dosahovat procesních teplot nad 3000°C bez zásadních omezení. Tavit lze tedy materiály s vysokým bodem tání nejen kovového, ale i oxidického či keramického charakteru.
- Je zajištěna vysoká čistota procesu, neboť vlivem intenzivního chlazení vsázka nepřijde do styku s materiálem kelímku. Na stěnách kelímku se vytváří tenká tuhá vrstva z vlastního taveného materiálu - *skull*, která zabrání kontaminaci samotné taveniny.
- Tavení probíhá v různých atmosférách, které kladně ovlivňují průběh procesu. Nejčastějším případem je tavení ve vakuu nebo inertní atmosféře, kdy nedochází ke zvyšování objemu kyslíku ve zpracovávaném materiálu. Současně odpadá použití některých nebezpečných plynů.
- Během ohřevu je vsázka roztavena vlivem elektromagnetického pole, čímž je eliminováno použití elektrod. Na rozdíl od alternativního obloukového tavení ve vakuu, které vyžaduje použití elektrod, lze při tavení ve studeném kelímku využít odřezky, desky, třísky i další formy vsázky. Toto značně redukuje cenu vstupních surovin.
- Prostřednictvím elektrodynamických sil dochází k pohybu částic v taveném materiálu. Vsázka je tedy intenzivně promíchávána v celém svém objemu; nečistoty přirozeně vyplouvají k vnějšímu povrchu taveniny, kde se odpaří nebo připojí k již existující krustě - *skull*. Tímto způsobem je zajištěna možnost dosáhnout superčistých homogenních slitin.

- Tato technologie je optimální pro tavení elektricky nevodivých materiálů z hlediska elektrické účinnosti, která u nich dosahuje až 90 %.
- Při návrhu nového nebo při optimalizaci již existujícího zařízení ISM lze uplatnit řadu softwarových nástrojů založených například na metodě konečných prvků (ANSYS, RILLFEM, MSC MARC, apod.). Simulovat lze prakticky všechny fáze procesu tavení – start a ustálený stav tavení. Virtuálním prototypingem lze v důsledku docílit významných úspor.
- Správnou volbou frekvence budícího proudu a amplitudy lze výrazným způsobem zefektivnit proces tavení.
- Metoda se využívá i pro řízenou krystalizaci materiálů. Proces tavení a krystalizace probíhá nepřetržitě, není zapotřebí žádné obsluhy. Umožňuje ve srovnání s jinými technologiemi vytvářet mnohem větší krystaly. Při směrové krystalizaci při teplotě 2800°C lze produkovat křišťálově čistý krystal, který představuje duplikát skutečného diamantu. Je znám pod obchodním názvem Zirkon a oproti přírodnímu je cena mnohokrát nižší a je k dostání téměř v jakékoliv barvě a sytosti.
- Proces dále umožňuje snadnější dávkování přísadových materiálů a legování. Například lze přidávat materiál přímo do taveniny, a to i při velkých objemech.
- Díky této metodě lze také zpracovávat radioaktivní odpady – ukládáním do keramických nebo skelných matric, ve kterých může být bezpečně skladován v hlubinných úložištích až několik tisíc let.
- Pokud je proces ISM prováděn ve vakuu, dochází k samovolnému odplynění kovové vsázky a vypaření nečistot s nízkým tlakem par. Výsledkem jsou kvalitní odlitky bez bublin.
- Intenzivní míchání způsobené elektromagnetickým polem napomáhá tavení složek s vysokým bodem tání a také homogenizaci taveniny. Výsledkem je rychlejší doba tavení, lepší zatékavost při lití do formy a vyšší kvalita výrobků.
- Absence keramického kelímku snižuje množství odstávek z důvodu výměny kelímku, čímž se zvyšuje produktivita pece.
- Při tavení slitin, jejichž složky mají vysoký tlak par, je možné ISM provádět v inertní atmosféře při tlaku, který zcela eliminuje nebo snižuje materiálové ztráty.
- Touto metodou lze zkoumat vlastnosti tavených materiálů na bázi oxidu uranu, zirkonu a železa, které by vznikly při haváriích v aktivních zónách atomových elektráren.

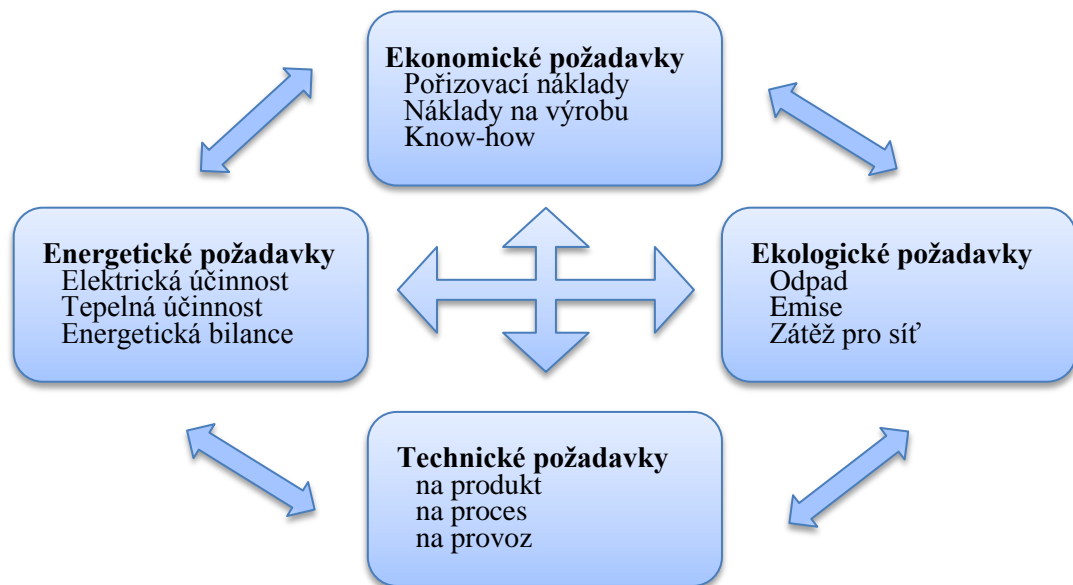
- ISM metoda se osvědčila při hromadné výrobě titanových odlitků. Vodou chlazený kelímek snese často více než 10000 licích cyklů. Byla potvrzena i životnost kelímku více než 100000 cyklů.
- V porovnání s jinými technologiemi nedochází k tak výrazným emisím hluku do okolí.
- Lze odlévat menší objemy taveniny, tenkostěnné a tvarově složité odlitky.
- Při vysokých teplotách lze zkoumat chemické reakce v taveném materiálu.

## 4.2 Nevýhody ISM

- Kelímek není vhodné využívat pro tavení materiálů s nízkým měrným odporem jako je měď nebo hliník, protože účinnost přenosu energie klesá s rostoucí konduktivitou kovu.
- Při tavení elektricky nevodivých materiálů je zapotřebí použít startovací metodu např. přímým ohřevem povrchu taveniny pomocí hořáků. Vytvořená krusta snižuje sice ztráty sáláním, ale technologie je poměrně časově náročná, vzniká nebezpečí zatumnutí taveniny nebo předčasná krystalizace. Proces je zapotřebí velice pečlivě kontrolovat. Z hlediska ekologického může dojít k chemické reakci mezi vsázkou a plamenem.
- Z energetického hlediska dochází k teplotním změnám během procesu tavení. Aby vsázka nezatuhla, je zapotřebí kompenzovat tepelné ztráty v kelímku a segmentech. Dle zahraničních měření není nutné započítávat ztráty v kelímku, pouze ztráty vznikající z povrchu taveniny sáláním. Dle velikosti kelímku se odvíjí tepelné ztráty, nicméně v porovnání s klasickým indukčním tavením nevodivých materiálů, dosahují menších hodnot, obecně do 40%.
- V porovnání tavení s keramickým kelímkem jsou pece se studeným kelímkem velice energeticky náročné. Je zapotřebí přibližně 2x více elektrické energie pro roztavení stejného množství materiálu.
- Vysoké pořizovací náklady na tavící pece, zavedení technologie, údržba během procesu.
- Z technologického hlediska je složitější výroba segmentů ve tvaru zaoblených lichoběžníků než výroba studeného kelímku skládaného z trubek. Nejnáročnější je pak výroba kelímku s integrovaným induktorem.
- Pro zvýšení účinnosti je zapotřebí nanášet izolační vrstvy pomocí  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nebo  $\text{ZrO}_2$  na každý segment zvlášť.



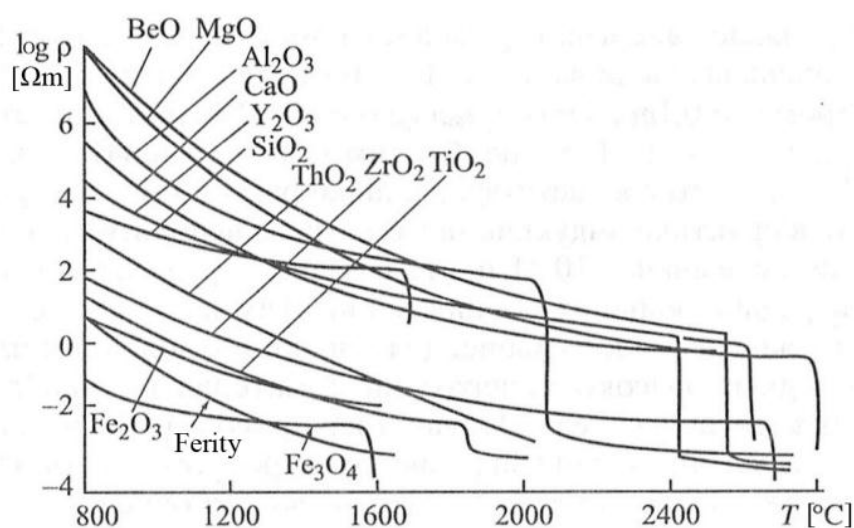
- Pokud je tato metoda využívána pro tavení reaktivních materiálů, je nezbytně nutné zhodnotit např. zavedení ochranné atmosféry nebo vhodné formy na lití.
- Při nekontrolovaném přívodu výkonu do vsázky hrozí proražení krusty, explozi a při poškození kelímku také k úniku roztaveného materiálu do okolního prostředí. K tomuto jevu může dojít při tavení nevodivých i vodivých materiálů. Příkladem je tavení TiAl, kde by zvýšené množství Al způsobilo při roztavování vysoký tlak s možností exploze.
- Je nutné velice intenzivně chladit kelímek, což vede k velké spotřebě chladicího média.
- Vzhledem ke komplexnosti dějů uplatňujících se při této technologii, jsou numerické simulace náročné jednak z hlediska přípravy samotného modelu zařízení a současně jsou kladeny vysoké nároky na výpočetní výkon. V extrémních případech jsou využívány počítačové clustery sloužící k paralelním výpočtům na více počítačích.



Obr. 25: Provázanost hodnotících kritérií

## 5 Tavení elektricky nevodivých materiálů

Nejčastěji se tavením ve studeném kelímku zpracovávají materiály se špatnou elektrickou vodivostí, jako jsou keramiky, skla a oxidy. Při pokojové teplotě vykazují velmi malé elektrické konduktivity, přibližně  $10^{-12} - 10^{-2}$  S/m a je proto nutné zavést startovací proces. Při tavení elektricky nevodivých materiálů je třeba dbát na správné určení parametrů. Klíčovými vlastnostmi jsou závislost elektrického odporu na teplotě (obr. 26) a použití optimální frekvence. V tab. 3 jsou uvedeny hodnoty elektrického odporu vybraných nevodivých materiálů v pevném a roztaveném stavu a vhodný kmitočet. Indukční tavení je prováděno při teplotách 2000°C - 3000°C. Elektrický odpor u taveného materiálu je podstatně nižší než u materiálu v pevném skupenství. [16] [17]



Obr. 26: Závislost měrného odporu na teplotě [16]

Tab. 3 – Hodnoty elektrického odporu a kmitočet nevodivých materiálů [16]

Materiál	Skupenství	Teplota [°C]	Elektrický odpor [Ω.cm]	Kmitočet [kHz]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	pevné	1875	$2,2 \cdot 10^4$	$6,6 \cdot 10^7$
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	tavenina	2200	$1 \cdot 10^{-1}$	300
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	pevné	1500	$3 \cdot 10^1$	$90 \cdot 10^3$
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	tavenina	2430	$5 \cdot 10^{-2}$	150
ZrO <sub>2</sub>	pevné	2000	1	$3 \cdot 10^3$
NaCl	tavenina	800	$3,3 \cdot 10^{-1}$	990
NaF	tavenina	1200	$1,9 \cdot 10^{-1}$	570

Pro zvýšení energie střídavého elektromagnetického pole v nevodivých materiálech je zapotřebí velmi vysoká frekvence, kterou lze určit ze vztahu (5.1)

$$f_{min} \geq 3 \cdot 10^6 \frac{\rho}{Dv^2} \quad [\text{Hz}] \quad . \quad (5.1)$$

Ze vztahu plyne, že minimální frekvence pro ohřev vsázky o průměru 10 cm při tavení oxidu zirkonu s rezistivitou 1  $\Omega$ .cm bude 300MHz. V praxi kmitočet pro indukční ohřev překročí velmi zřídka hodnotu 10MHz. Je tedy zapotřebí nejdříve materiál zahřát na takovou teplotu, při které se sníží hodnota elektrického odporu materiálu. Toho lze dosáhnout několika způsoby. [16] [17]

## 5.1 Proces tavení

Tavení elektricky nevodivých materiálů metodou studeného kelímku je velice složité a je zapotřebí kontrolovat veškeré etapy procesu. Klíčovou fází tavby je startovací proces prostřednictvím určitého zdroje tepla, v další fázi se do taveniny absorbující elektromagnetické pole přidávají směsi k dosažení požadovaného objemu materiálu a v poslední fázi je tavenina udržována dostatečnou dobu v rovnovážném stavu pro dokončení celého procesu. [16] [17]

Jak již bylo zmíněno, je třeba dbát na chemickou čistotu materiálu a jakým způsobem bude teplo přiváděno, zda pouze do určité oblasti nebo do celého objemu.

### 5.1.1 Objemový ohřev

U tohoto způsobu je vsázka ohřívána v celém objemu, je zde zanedbán vliv chlazených stěn kelímku a tím dochází k vyšší elektrické účinnosti v porovnání s povrchovým ohřevem. [16] [17]

Nejpoužívanější způsob pro nastartování tavby spočívá v přidání materiálu, který lze za určitých podmínek pomocí elektromagnetické indukce roztavit, viz obr. 27. Aplikace je vhodná pro tavení  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  atd. Při použití  $\text{Al}_2\text{O}_3$  je na povrch vsázky vloženo malé množství hliníku ve formě drátků, granulí nebo prášku, pro omezení tepelných ztrát je poté materiál zasypán vrstvou oxidu. Kousky kovu během tavení reagují s kyslíkem a při určité teplotě dojde ke vzplanutí. Tímto způsobem může dojít ke kontaminaci vsázky a je proto velice důležité volit přídatné materiály dle fyzikálních a chemických vlastností. Při tavení  $\text{ZrO}_2$ , kde je jako startovací materiál použit metalický zirkon, není vsázka negativně ovlivňována. Pokud je do taveniny přidáno větší množství přídatného kovu, než je povolená

hranice, dochází vlivem elektromagnetického pole k roztavení celé vsázky, až na vrstvu, která přiléhá k chlazeným stěnám kelímku. Stanovení množství přidávaného kovu pro ohřev daného objemu taveniny  $V_T$  lze využít vzorec [16] [17]:

$$g = Z \cdot V_T \quad [\text{kg}] \quad . \quad (5.2)$$

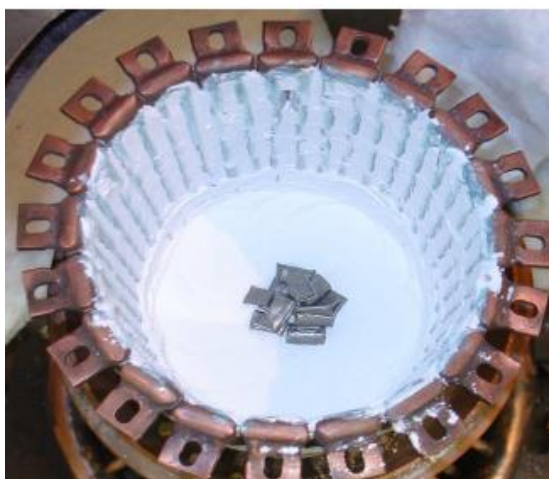
Pro nejčastěji využívané kovy je dle tab. 4 uvedena měrná hmotnost.

**Tab. 4 – Měrná hmotnost kovů [16]**

<b>Materiál</b>	Titan	Hliník	Zirkon	Chrom	Berylium	Ytrium	Skandium
<b>Z [kg/m<sup>3</sup>]</b>	550	480	1150	1220	420	985	515

Pro snížení energetických ztrát je důležité, aby čas oxidace kovu byl co nejkratší. Dobu vzplanutí ovlivňuje velikost a plocha částic přidávaného materiálu do taveniny. Touto metodou není možné tavit žárupevné oxidy kovů alkalických zemin, např. Mg, Ca, Ba, Sr, apod. Tyto materiály mají nižší hodnotu teploty vznícení par než bod tání jejich oxidů. [16] [17]

Dalším možným způsobem objemového ohřevu je zavedením elektricky vodivého tělesa do vsázky, které je indukčně ohříváno elektromagnetickým polem cívky, viz obr. 28. Tento způsob metody se využívá převážně při tavení skel nebo YBCO. Příkladem mohou být grafitové, karbonové nebo iridiové kroužky umístěné na povrchu taveniny pro zahřátí taveniny. Po dosažení potřebného elektrického odporu je kroužek vyjmut. Méně využívaným případem je zavedení tělesa z žárupevného kovu, např. wolframu, molybdenu. [16] [17]



**Obr. 27: Startovací metoda s elektricky vodivým materiálem [18]**



**Obr. 28: Startovací proces s grafitovým kroužkem [18]**

### 5.1.2 Povrchový ohřev

Pomocí tohoto způsobu lze ohřev provést na horním povrchu vsázky, která není v přímém kontaktu se studeným kelímkem. Určitou část vsázky lze tedy roztavit jiným zdrojem tepla. [8]

Pro tavbu skel je nejčastěji využívaným zdrojem plazmový hořák. Plazma je elektricky vodivý plyn složený z iontů a elektronů, který vzniká odtržením elektronů z obalu atomů plynů, či ionizací. Jedná se o nejrozšířenější formu látky a nejpoužívanějšími typy plynů při této technologii můžou být argon, dusík, směs argonu a vodíku nebo směs kyslíku a vzduchu. Princip plazmového hořáku spočívá v přeměně elektrické energie na tepelnou energii usměrněného proudu plazmatem. Elektrický oblouk, který při reakci vznikne lze stabilizovat plynem nebo vodou. Pro ohřev elektricky nevodivých materiálů se využívá hořák s tzv. netransferovaným obloukem. Hoření oblouku probíhá pomocí elektrody a výstupní trysky. Pro tavení vodivých materiálů je zaveden hořák s transferovaným obloukem, který vzniká mezi vnitřní elektrodou a ohřívaným materiálem. Při tomto způsobu ohřevu však může dojít ke kontaminaci vsázky. [27]

Další možnost povrchové ohřevu je využití laserového paprsku. Princip laseru spočívá na základě indukované emise, která je vyvolána dopadem záření na atom prvku. Elektron obíhající kolem jádra přijme energii a vystoupá výš na oběžnou dráhu. Díky rovnováze sil v atomu je elektron vrácen zpět na svou oběžnou dráhu a vyzáří přijatou energii do prostoru. Existují tři základní typy laserů – plynové, pevnolátkové a polovodičové lasery. Paprsek u plynových laserů vzniká v plynném prostředí, nejčastěji jsou to helium, argon nebo neon. V případě pevnolátkových laserů je aktivním prostředím homogenní krystal s příměsí cizorodé látky. Zatím nejnovější skupinou jsou polovodičové lasery, známé jako laserové diody, pracující na principu PN přechodu. [27]

Prvotní ohřev lze provést také pomocí plynových hořáků, které nevyklučují možnost kontaminace vlivem vzájemného působení taveného materiálu a vzniklých spalin, což má negativní vliv na čistotu a kvalitu výsledného produktu. Další nevýhodou je velká rychlost proudění způsobená plamenem v případě použití práškové vsázky. [27]

Za určitých okolností lze využít také elektrický oblouk, který je umístěn buď nad povrchem vsázky, nebo přímo v taveném materiálu.

### 5.1.3 Fáze tavení nevodivých materiálů ve studeném kelímku

- Ohřev taveniny pomocí startovací metody
- Roztavení materiálů a vytvoření tuhé krusty *skull*
- Tuhnutí nebo krystalizace taveniny

Možné způsoby pro nastartování taveniny byly již zmíněny v kap. 5.1.1. a 5.1.2. S ohledem na vlastnosti taveného materiálu a požadavky na výsledný produkt lze zvolit optimální řešení.

Tavení oxidů probíhá ve vzduchu, při tavení je vlivem intenzivního chlazení mezi kelímkem a krustou vytvořena tuhá, tenká krusta *skull*. Je tedy zapotřebí nejen kelímek chladit, ale také regulovat výkon, který je přenášěn do vsázky. Vlivem skin-efektu jsou vířivé proudy v tavenině vytlačovány směrem k vytvořené krustě a tím následně nastává zvýšení teploty taveniny v této oblasti a vyšší vodivosti. Během tavení dochází vlivem víření taveniny k homogenizaci vsázky. Víření taveniny popisuje Lorenztova a Archimédova síla. Je nutné kompenzovat především ztráty vedením a ztráty sáláním, jinak by mohlo dojít k zatuhnutí taveniny. Výkon, který se v kelímku musí přenést z induktoru do taveniny, platí dle (5.3). [15]

$$P_2 = \frac{dQ_2}{dt} + P_L \quad , \quad (5.3)$$

kde

$$P_L = P_w + P_b + P_{rad} \quad .$$

Výkon zahrnuje energii ( $Q_2$ ), která je zapotřebí pro změnu z výchozí teploty na teplotu tavení materiálu a na změnu skupenství z pevného na kapalné, ztráty vedením do stěn ( $P_w$ ) a dna kelímku ( $P_b$ ) a ztráty sáláním z povrchu taveniny ( $P_{rad}$ ). [15]

Tepelné ztráty do dna kelímku lze zanedbat díky dokonalé izolaci dna a zohledníme pouze ztráty vedením do stěn kelímku [15]:

$$P_w = \pi d_2 h_2 q_w \quad . \quad (5.4)$$

Tepelné ztráty z povrchu taveniny [15]:

$$P_{rad} = \frac{\pi}{4} d_2^2 \varepsilon_0 \sigma (T_2^4 - T_0^4) \quad . \quad (5.5)$$

Hodnota  $q_w$  představuje měrné tepelné ztráty,  $\sigma$  je Stefan-Boltzmannova konstanta,  $d_2$  průměr kelímku,  $h_2$  výška kelímku a  $\varepsilon_0$  je součinitel emisivity.

Při tavení oxidů se na povrchu taveniny vlivem přídavného materiálů může vytvořit krusta, která zabraňuje možnosti dalšího přidání materiálů. Jednou z možností odstranění tuhé vrstvy je pomocí keramických tyčí. [15]

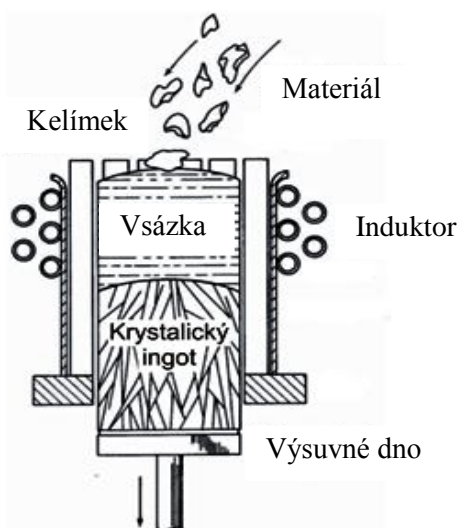
Pokud je povrch vsázky pokryt krustou, nedochází k intenzivnímu odpařování kontaminací. Odpařování kontaminací je jeden z kladných faktorů této technologie. Pokud je vsázka tavena bez speciální atmosféry, je možné redukovat nežádoucí příměsi, např. síru, dusík, chlór, alkalické kovy a další. Je zapotřebí kontrolovat rychlost odpařování, která je závislá především na teplotě a tlaku par. Pokud by byla rychlost příliš vysoká, došlo by ke ztrátě vzájemného působení mezi cívkou a taveninou, následně k zastavení ohřevu a zahájení procesu krystalizace. [15] [16] [17]

Pokud je vsázka roztavena a docílí se požadovaných hodnot, následuje další fáze ochlazování. Probíhá buď okamžitým odpojením od zdroje, nebo je postupně v několika krocích snižováno napětí. Po odpojení generátoru následuje poslední fáze – krystalizace nebo tuhnutí. Na základě pomalého tuhnutí směrem od stěn kelímku do vnitřku dochází k vytvoření skleněné kompozice. Proces spontánní krystalizace nastává u polykrystalických ingotů a mezi nejpoužívanější metody krystalizace patří metoda směrového tuhnutí a Czochralského metoda. [15] [16] [17]

#### **5.1.4 Metoda směrové tuhnutí**

Pro získání vysoce kvalitních krystalů se využívá princip tzv. směrového tuhnutí, který byl v polovině 80. let minulého století patentován společností Siliconsultant v provedení pro křemík. Pro přípravu křemíkových ingotů má tato metoda vyšší produktivitu avšak nevýhodou je obecně menší velikosti zrn z důvodu rychlého chladnutí taveniny. Nicméně největší předností této technologie je dokonalá čistota výsledných krystalů. V zařízeních instalovaných v Evropě a Japonsku byly připraveny křemíkové ingoty o váze více jak 40 kg a průřezu 35x35 cm. Velikost výsledného krystalového produktu závisí především na rychlosti ochlazování taveniny. Pro vyšší účinnost chlazení je zapotřebí přidávat další topná zařízení, jelikož tato metoda má omezenou schopnost regulace teploty změnou výkonu generátoru. [28]

Na obr. 29 je zobrazen velmi jednoduchý princip této metody. Studený kelímek se vsázkou je snižen proti poloze cívky, čímž dochází k chlazení spodní vrstvy taveniny a následné krystalizaci.

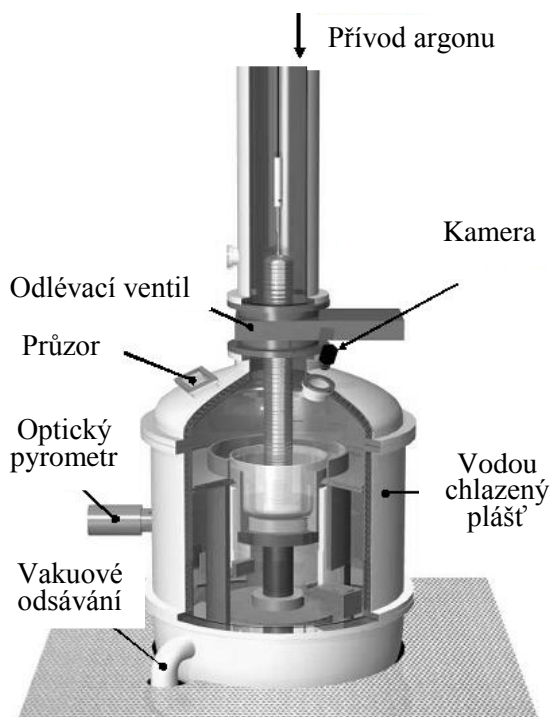


Obr. 29: Princip směrového tuhnutí [28]

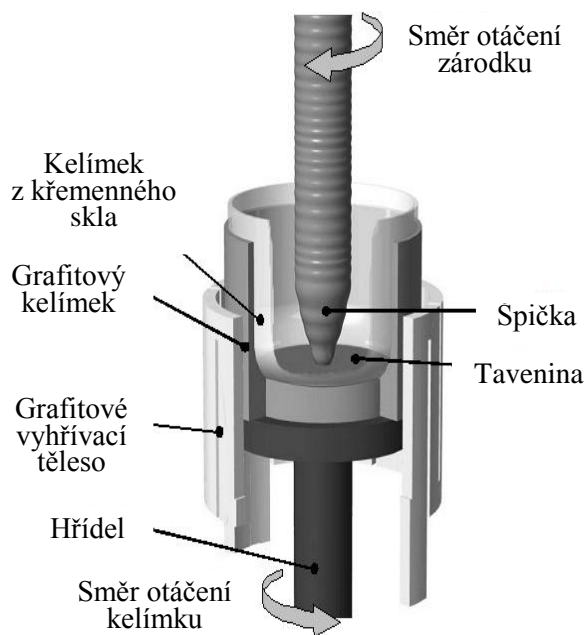
### 5.1.5 Czochralského metoda

Roku 1918 byla objevena metoda přípravy monokrystalů křemíku z vlastní taveniny, tzv. Czochralského metoda. Před samotnou výrobou monokrystalu křemíku je nutné připravit polykrystalický křemík řádové čistoty ppm (parts per million). [29]

Zpracování polykrystalického křemíku na monokrystalický probíhá v zařízeních, která se nazývají „tažičky“ (puller). [29]



Obr. 30: Průřez zařízení [29]



Obr. 31: Dolní průřez zařízení [29]

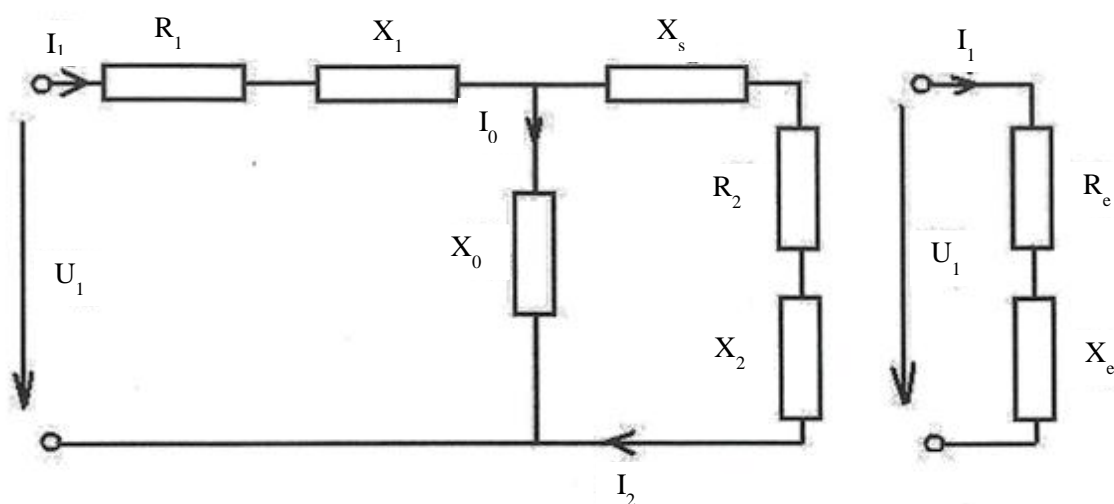


Zařízení sestává z křemenného kelímku, jehož teplota tání převyšuje teplotu tání křemíku a také teplotu topného tělesa (2000°C). Při těchto teplotách bohužel dochází k deformaci kelímku, proto je nezbytné podepřít jej grafitovým kelímkem. Další jednotkou zařízení je systém přívodu a odvodu inertní atmosféry (argon). [29]

Mechanismus umožňující posuv a rotaci krystalu (i kelímku) je zajištěn hřídelí nebo lankem. Rychlost posuvu a rotace má např. vliv na vznik defektů v monokrystalu křemíku. Posuv kelímku je zajištěn grafitovou stopkou. Důležitou částí zařízení je topná část, která se skládá z grafitového topného tělesa, grafitového kelímku a dále z grafitových izolací sloužících k soustředění co největšího množství přiváděného tepla do taveniny. [29]

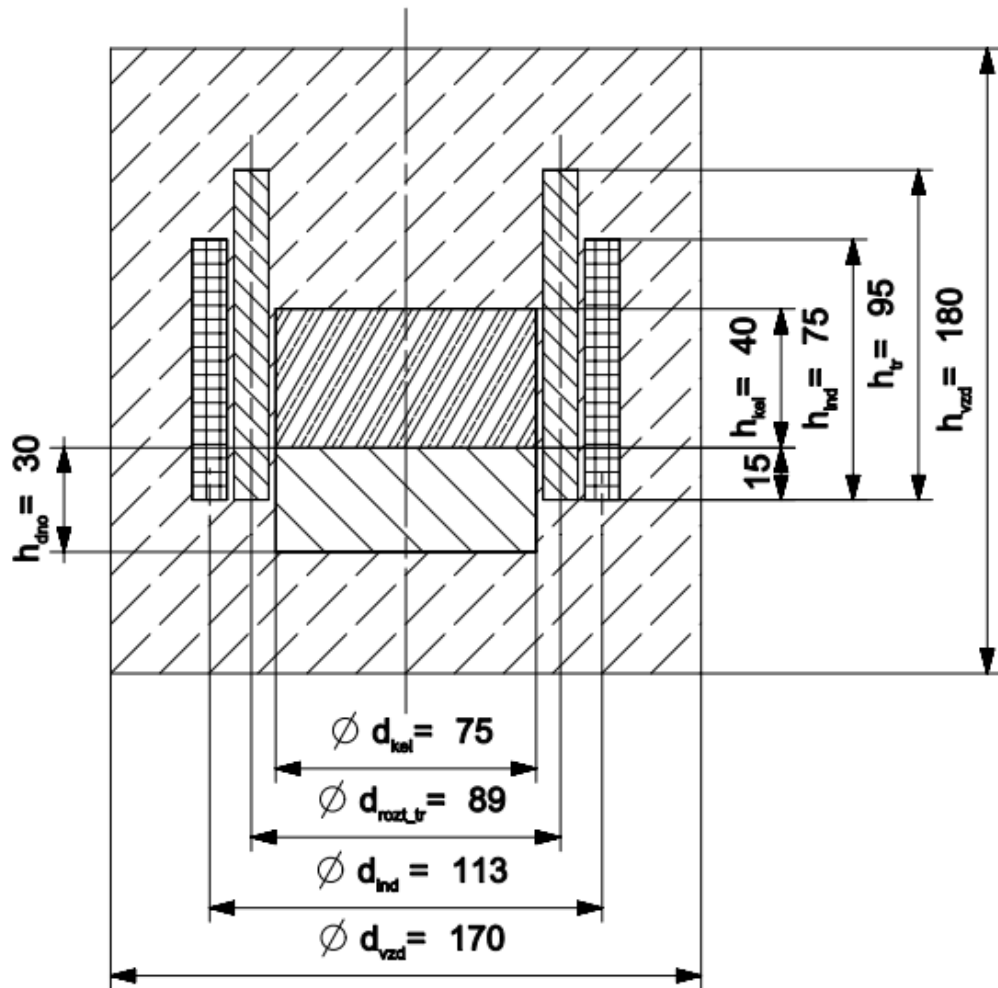
### 5.1.6 Analytický výpočet tavení nevodivého materiálu $ZrO_2$ v ustáleném stavu

Při reálném výpočtu indukčních tavicích zařízení je aplikace elektromagnetických vztahů v nekonečně dlouhém systému velice problematická. Reálně se konečným hodnotám blíží více propočet v krátkém systému. Pomocí náhradního schéma z obr. 32 pro induktor s jedním závitem, lze dle vzorců spočítat hodnoty pro optimální tavení. V obvodu není zahrnuta impedance studeného kelímku a uvažujeme rovnoběžnost siločar magnetického pole uvnitř kelímku s osou kelímku. [15]



Obr. 32: Náhradní obvod [15]

Pro výpočet náhradního obvodu provedeme návrh studeného kelímku podle obr. 33, který je možný uplatnit v praxi. Rozměry kelímku jsou uvedeny v tab. 5.



Obr. 33: Návrh studeného kelímku

Tab. 5 – Parametry kelímku

Průměr induktoru [cm]	Vnitřní průměr kelímku [cm]	Výška induktoru [cm]	Výška taveniny [cm]	Tloušťka stěny plechu [cm]	Vnější průměr trubek [cm]
11,3	7,5	18	4	0,3	1,5

Taveným materiálem bude nevodivý materiál –  $ZrO_2$ . V tab. 6 jsou uvedeny hodnoty vlastností materiálů, které jsou již prověřené z měření na Institutu elektrotepelných procesů v Rusku - Petrohradu.

Tab. 6 – Hodnoty pro  $ZrO_2$ 

Veličina	$q_w$ [ $W/cm^2$ ]	$q_{rad}$ [ $W/cm^2$ ]	$\epsilon_0$ [-]	T [ $^{\circ}C$ ]	$\rho$ [ $\Omega \cdot cm$ ]
Popis	Měrné tepelné ztráty do stěn	Měrné tepelné ztráty z povrchu taveniny	Součinitel emisivity	Teplota v ustáleném stavu	Měrný odpor při dané teplotě
$ZrO_2$	90	73	0,8	2750	0,01

**Výpočet optimálního kmitočtu**

Optimální kmitočet při dosažení měrného odporu, permeability a vnitřního průměru kelímku bude dle vztahu [15]:

$$f = 3,6 \cdot 10^8 \left( \frac{\rho}{\mu \cdot d_{kel}^2} \right) = 64 \quad [\text{kHz}] \quad . \quad (5.6)$$

**Výpočet hloubky vniku naindukovaných proudů**

Po dosažení měrného odporu, permeability a optimální frekvence pro materiál  $\text{ZrO}_2$  je hloubka vniku naindukovaných proudů do taveniny [15]:

$$a = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} = 1,998 \quad [\text{cm}] \quad . \quad (5.7)$$

**Výpočet optimálního argumentu cylindrické funkce**

$$x_2 = \frac{r_2 \sqrt{2}}{a} = 2,654 \quad [-] \quad . \quad (5.8)$$

**Výpočet množství startovacího materiálu  $\text{ZrO}_2$** 

Optimální rozmezí objemu startovacího materiálu pro kelímky, které mají průměr < 20 cm platí [15]:

$$V_{st} = (0,08 \div 0,04) d_{kel}^3 = (33,75 \div 16,875) \quad [\text{cm}^3] \quad . \quad (5.9)$$

Z této hodnoty je možné spočítat optimální množství k tavení [15]:

$$m_{me} = 0,5463 \cdot (0,08 \div 0,04) d_{kel}^3 = (18,438 \div 9,219) \quad [\text{g}] \quad . \quad (5.10)$$

**Výpočet výkonu do taveniny**

V ustáleném stavu platí, že

$$P_2 = P_L = P_w + P_b + P_{rad} = 11,701 \quad [\text{kW}] \quad . \quad (5.11)$$

$P_2$  – přenášený výkon do taveniny,  $P_L$  – celkové ztráty,  $P_w$  – ztráty do stěn kelímku,  $P_b$  – ztráty dnem (díky dokonalé izolaci jsou zanedbány),  $P_{rad}$  – ztráty sáláním [15]

Po dosazení hodnot do (5.12) pro výpočet ztrát vedením tepla stěnou kelímku a do vzorce pro výpočet tepelných ztrát sáláním je potřebný výkon [15]:

$$P_w = \pi \cdot d_{kel} \cdot h_{kel} \cdot q_w = 8,478 \quad [\text{kW}] \quad , \quad (5.12)$$

$$P_{rad} = \frac{\pi}{4} d_{kel}^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \sigma (T^4 - T_0^4) = 3,223 \quad [\text{kW}] \quad . \quad (5.13)$$

Parametr  $\sigma$  je Stefan-Boltzmannova konstanta,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4]$

### Výpočet ekvivalentní impedance

Po dosazení průměru induktoru a tloušťky stěny induktoru je korekční součinitel induktoru [15]:

$$k_1 = \frac{1}{1 + \frac{d_{ind}}{h_{ind}} [0,515 + 0,218(\frac{s}{d_{ind}})^{0,406}]} = 0,753 \quad [-] \quad . \quad (5.14)$$

Rozptylová reaktance  $X_0$  a rozptylová reaktance ve vzduchové mezeře mezi induktorem a kelímkem  $X_m$  platí dle vztahů [15]:

$$X_{10} = \varpi \mu_0 \frac{\pi d_{ind}^2}{4 h_{ind}} = 2,815 \quad [\Omega] \quad , \quad (5.15)$$

$$X_0 = X_{10} \frac{k_1 h_{ind}}{h_{ind} - k_1 h_{kel}} = 2,546 \quad [\Omega] \quad , \quad (5.16)$$

$$S_m = \frac{\pi}{4} [d_{ind}^2 - (d_{kel} + 2s_{kel})^2] = 0,001369 \quad [\text{m}^2] \quad , \quad (5.17)$$

$$X_s = \varpi \mu_0 \frac{S_m}{h_{ind}} = 0,00173 \quad [\Omega] \quad . \quad (5.18)$$

### Výpočet odporů a reaktancí induktoru [15]

$$R_1 \approx X_1 \approx \frac{n^2 \pi d_{ind}}{g h_{ind} \gamma_1 a_1} = 0,00428 \quad [\Omega] \quad , \quad (5.19)$$

$$R_2 = \frac{n^2 \pi x_2^2}{\gamma_2 h_{kel}} A(x_2) = 4,0917 \quad [\Omega] \quad , \quad (5.20)$$

$$X_2 = \frac{n^2 \pi x_2^2}{\gamma_2 h_{kel}} B(x_2) = 2,2095 \quad [\Omega] \quad . \quad (5.21)$$

$$p_k^2 = \frac{X_0^2}{R_2^2 + (X_2 + X_m + X_0)^2} = 0,1646 \quad [-] \quad (5.22)$$

$p_k$  vyjadřuje transformační poměr mezi dvěma indukčně svázanými obvody

$$X_e = X_1 + X_{21} = X_1 + p_k^2 \left[ X_s + X_2 + \frac{R_2^2 + (X_2 + X_m)^2}{X_0} \right] = 1,7667 \quad [\Omega] , \quad (5.23)$$

$$R_e = R_1 + R_{21} = R_1 + p_k^2 R_2 = 0,1151 \quad [\Omega] , \quad (5.24)$$

$$Z_e = \sqrt{R_e^2 + X_e^2} = 1,77044 \quad [\Omega] . \quad (5.25)$$

**Výpočet proudu, napětí, účinnosti, příkonu, zdánlivého výkonu a účinníku [15]**

$$I_1 = \sqrt{\frac{P_2}{p_k^2 R_2}} = 1274 \quad [\text{A}] , \quad (5.26)$$

$$U_1 = Z_e \cdot I_1 = 2256 \quad [\text{V}] , \quad (5.27)$$

$$\eta_1 = \frac{p_k^2 R_2}{R_e} = 96,3 \quad [\%] , \quad (5.28)$$

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_1} = 186,915 \quad [\text{kW}] , \quad (5.29)$$

$$S_1 = U_1 I_1 = 2874 \quad [\text{kVA}] , \quad (5.30)$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{R_e}{Z_e} = 0,065 \quad [-] . \quad (5.31)$$

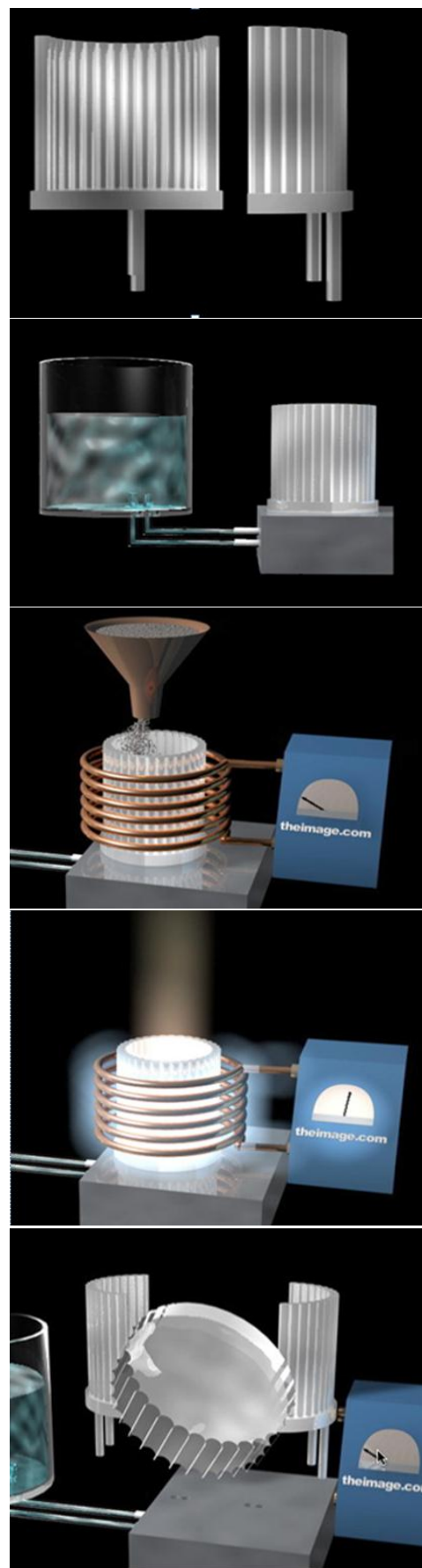
### 5.1.7 Tavení $ZrO_2$

Proces tavení ve studeném kelímku byl vyvinut v Lbeděvově fyzikálním institutu v Moskvě pro výrobu umělého kubického zirkonu. Protože bod tání zirkonového prášku je vysoce nad  $2000^{\circ}C$ , nelze jej tavit v žádném z konvenčních žárupevných kelímků. Výsledným produktem je syntetický diamant, který vzniká postupem zónové krystalizace při  $2800^{\circ}C$ . Ve šperkařském průmyslu pod názvem Zirkon slouží jako náhražka pravých diamantů. [24] [30]

Prášek oxidu zirkonu je ohřát pomocí vysokofrekvenční indukce a dále zvolna ochlazován. Vnější stěny zařízení jsou vodou chlazené, aby nedošlo k roztavení cívky. Zároveň je takto chlazen také vnější povrch oxidu zirkonu, čímž je zajištěn výsledný tvar odlitku. [30]

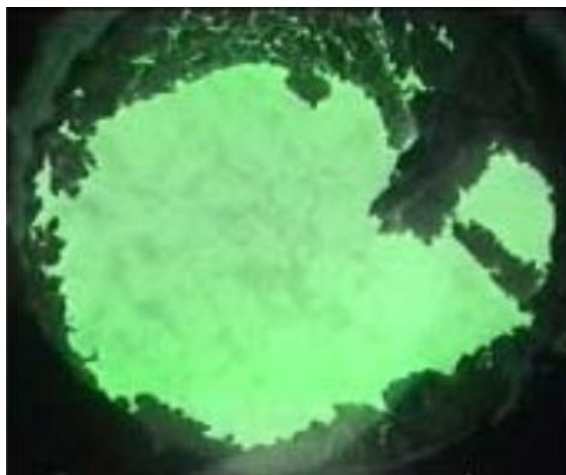
Vzhledem k tomu, že oxid zirkoničitý v tuhé fázi nevede elektrickou energii, je nutné na začátku procesu do podavače umístit část kovového zirkonu. Jakmile dojde k jeho roztavení, zoxiduje a smísí se s oxidem zirkoničitým, čímž se tento stane vodivým a může dojít k ohřevu pomocí indukce. [30]

Když je oxid zirkoničitý roztaven zevnitř (avšak ne zcela, neboť vnější povrch je nutno zachovat tuhý), je snížena amplituda VF indukční cívky a při procesu chladnutí taveniny se vytváří krystaly. Za běžných podmínek krystalizuje oxid zirkoničitý v jednoklonné soustavě. Pro dosažení krychlové krystalografické struktury je nutné přidat stabilizační činidla, jako hořčík, vápník nebo oxid yttria, stejně jako další barvicí příměsi. [30]



Obr. 34: Technologický postup ISM [30]

Kubický zirkon bývá většinou bez vnitřních vad, ačkoliv občas se vyskytnou bubliny, částečně nebo zcela zaplněny oxidem zirkonu. Existuje mnoho výrobců kubického zirkonu jako např. Ceres Corporation (Massachusetts, US), Singh Industries (New Jersey, US) a Taiwan Crystal (Taiwan). [24]

Obr. 35: Tavenina  $ZrO_2$  v ustáleném stavu [18]Obr. 36: Ingot  $ZrO_2$  po vychladnutí [18]

## 6 Tavení elektricky vodivých materiálů

Tavení ve studeném kelímku je vhodné především pro tavení materiálů se špatnou elektrickou vodivostí. Jsou zde však i možnosti využití studeného kelímku pro tavení žárupevných kovů a jejich sloučenin, které mají vysoký bod tavení a klasické pece s keramickým kelímkem při tavení selhávají a vsázku kontaminují. V tab. 7 jsou uvedeny nejvíce využívané žárupevné materiály a jejich sloučeniny. [15] [16] [17]

**Tab. 7 – Bod tavení žárupevných kovů**

Materiál	Bod tavení	Oxidy	Karbidy	Boridy	Nitridy	Silicidy	Sulfidy
Titan	1725	1840	3140	2980	2950	1540	2000
Křemík	1414	1728	2400	-	1900	-	1000
Wolfram	3410	1470	2870	2600	-	2165	1100
Molybden	2625	-	2690	2100	-	2100	1180
Zirkon	1830	2700	3530	3000	2980	1700	2050

Při tavení elektricky vodivých materiálů není zahájen startovací proces, jelikož materiály dosahují dostatečně velké konduktivity a není zapotřebí k ohřevu tak vysokých frekvencí jako u elektricky nevodivých materiálů. Kmitočet se pohybuje v rozmezí 10 – 30 kHz. [15] [8]

## 6.1 Tavení titanu

V současnosti je nejvíce zkoumaným prvkem titan a jeho sloučeniny. Titan lze díky svým výjimečným vlastnostem použít v aplikacích, kde jiné kovy selhávají. Například v leteckém průmyslu, automobilovém průmyslu, lékařském průmyslu a vysoce únosných konstrukcích, díky jeho vysokému poměru pevnosti vůči hmotnosti. Vzhledem k jeho odolnosti vůči korozivním prostředím je též využíván v chemickém průmyslu. Kov rychle vytváří stabilní vrstvu oxidu v oxidačních a neutrálních vodných roztocích a je téměř imunní proti kyselinám dusíku, chlóru a halidovým solím. [10]

Navzdory těmto vlastnostem je aplikace titanu mnohdy limitována jeho relativně vysokou cenou. Titanové odlitky jsou například několikrát dražší než odlitky z nerezové oceli. Cenu ovlivňuje hned několik faktorů [10]:

- Titan snadno reaguje s kyslíkem a dusíkem a jeho tavení, lití i chlazení musí probíhat ve vakuu, případně v jiných inertních atmosférách
- Titan je nutné odlévat do drahých nereaktivních forem (nejčastěji sloučeniny zirkonia, thoria a yttria)
- Recyklace titanu je obtížná
- Lití titanu často vyžaduje náročné opravy a zdokonalování odlitků

Tavení ve studeném kelímku minimalizuje tyto nevýhody. Proces nabízí mnoho výhod při lití titanu metodou vytavitelného modelu, jako například zkrácení doby cyklu v porovnání s klasickým indukčním tavením ve vakuu. Využívá vodou chlazený měděný kelímeček, čímž odstraňuje kontaminaci spojenou s klasickým indukčním tavením ve vakuu v keramickém kelímku a zároveň umožňuje recyklaci šrotového kovu. Metoda ISM je atraktivní technologií pro výrobu široké škály nízkonákladových titanových odlitků vysoké kvality. [10]

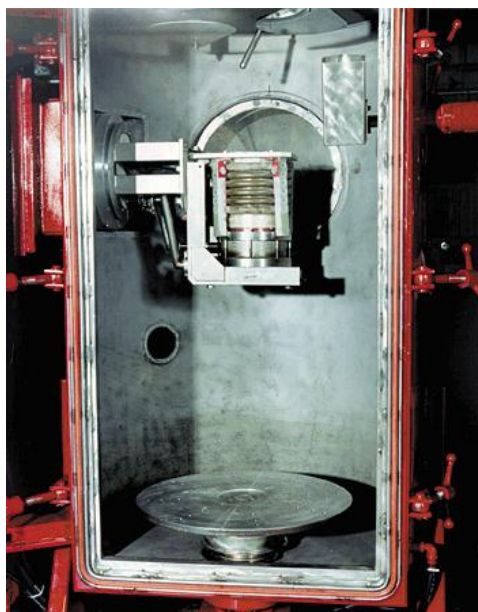
Výroba forem pro lití titanu za použití metody vytavitelného modelu je obdobná jako u forem pro odlitky ze slitin železa. Kromě některých důležitých rozdílů. V případě slitin železa je pro materiál forem používán zirkon, oxidy křemíku a hliníku. Vzhledem k vysoké afinitě titanu ke kyslíku, nelze stejné žárupevné oxidy použít pro formy na lití titanu. Použití těchto materiálů vede k nežádoucímu stavu povrchu odlitků a jejich vysoké porozitě. Zároveň dochází k vytvoření křehké hluboké vrstvy reaktantů, což způsobuje obtížné obrábění z důvodu jejich tvrdosti. Tato vrstva zároveň podněcuje vznik trhlin ve vysoce pevných slitinách, jako např. Ti-6Al-4V. Formy pro lití ztraceným modelem musí být vyrobeny z žárupevných materiálů na bázi zirkonu, thoria a yttria. [10]



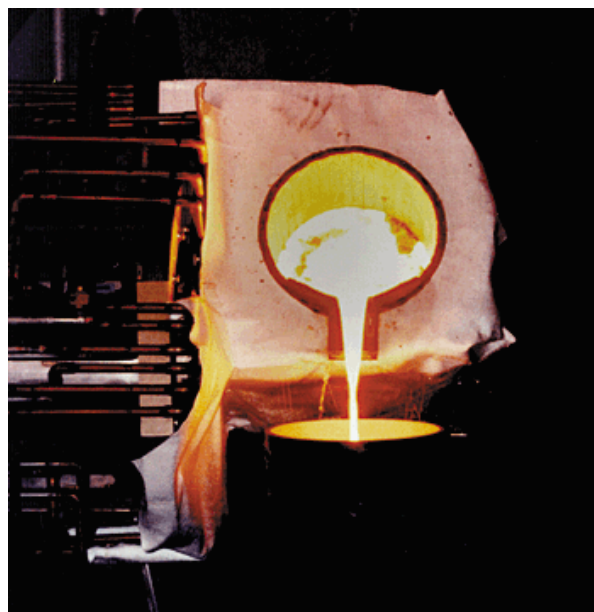
Pevnost odlitků je ovlivněna obsahem kyslíku v titanu – vyšší obsah kyslíku způsobuje vyšší pevnost. Z tohoto důvodu je obsah kyslíku v surovém materiálu pečlivě kontrolován. Recyklát s vysokým obsahem kyslíku je míchán s čistým materiálem chudým na kyslík. Dále může být pro zvýšení obsahu kyslíku v tavenině snadno přidán oxid titaničitý. Takto lze docílit opakovatelný obsah kyslíku pro každé lití. [10]

Proces ISM dále umožňuje snadnější dávkování přísadových materiálů a legování. Například lze přidávat materiál přímo do taveniny, a to i při velkých objemech. Současně lze snadno řídit dávkování příměsí s vysokým tlakem par, jako je např. mangan. Kov je možné udržovat roztavený po delší dobu, dokud nedojde ke kompletnímu roztavení příměsí, jako např. tantalu nebo wolframu. [10]

Poté, co je roztavený materiál nalit do formy (obr. 38), zůstane v kelímku tenká skořepina. Ta může být rychle odstraněna, což umožňuje relativně rychlou přípravu pro tavení jiné slitiny. Např. po 40kg vsázce průmyslově čistého titanu může následovat tavení 40kg vsázky slitiny Ti-6Al-4V a poté 40kg vsázky zirkonu s minimální časovou prodlevou a bez rizika vzájemné kontaminace materiálů. Tím ISM metoda zkracuje licí časy. [10]



Obr. 37: Jednokomorová pec s odstředivou licí deskou pro 10 kg vsázku [10]



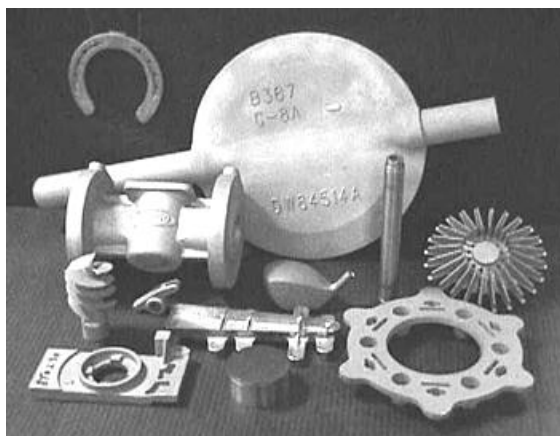
Obr. 38: Lití vsázky z ISM pece do formy [10]

Výhodou ISM při lití titanu do ztraceného modelu je zejména možnost získání vysoce kvalitních odlitků při nízkých nákladech. Snížení nákladů je způsobeno zejména dvěma faktory. Jednak je eliminována drahá výroba tavných elektrod a také je pro vsázku použit levnější, dosud stále certifikovaný materiál (z hlediska chemického složení). Porovnání výrobních dat při odlévání metodou ISM a VAR je uvedeno v tab. 8. Data pocházejí z dvouleté výroby hlav golfových holí ze slitiny Ti-6Al-4V ve slévárně na Taiwanu. [10]

Tab. 8 – Porovnání metody ISM a VAR [10]

Metoda	VAR	ISM
Provoz dny/rok	230	230
Provoz hodiny/den	24	24
Provoz hodiny/rok	5520	5520
Dostupnost	82%	82%
Průměrný čas cyklu	7,75 minut	6 minut
Roztavení/den	152,32	196,8
Roztavení/rok	35,034	45,264
Spotřeba materiálu/rok	536,021 kg	339,480 kg
Náklady na tavení	\$15/kg	\$8,25/kg
Hmotnost elektrody	129 kg	-
Zpětné využití materiálu	30%	40%
Využití čistého materiálu	70%	60%
Počet elektrod	12	-
Hmotnost čistého materiálu/cyklus	10,71 kg	4,5 kg
Hmotnost zpětně využitého materiálu/cyklus	4,59 kg	3,0 kg
Hmotnost čistého materiálu/rok	375,215 kg	203,688 kg
Hmotnost zpětně využitého materiálu/rok	160,806 kg	135,792 kg
Náklady na čistý materiál/rok	\$5 628 211	\$1 680 426
Náklady na zpětně využitý materiál/rok	\$804 032	\$407 376
Celkové náklady na materiál/rok	\$6 432 253	\$2 087 802
Náklady na materiál/cyklus	\$183,60	\$46,13
Investiční náklady	\$1 290 000	\$1 100 000
Amortizace zařízení	2 roky	2 roky
Investice na rok	\$696 600	\$594 000
Celkové náklady/cyklus	\$203,48	\$59,25
Počet odlitků/tavba	15	11
Výnos	85%	85%
Náklady/počet odlitků	\$15,96	\$6,34
Množství odlitků/rok	446,684 kg	423,218 kg

Je patrné, že ISM proces je výhodnější než běžný VAR proces pro vysoké objemy produkce. ISM proces je také vhodný pro výrobu kritických leteckých komponentů, stejně tak i prototypových odlitků. [10]



Obr. 39: Odlitky z titanu vyrobené metodou ISM [10]



Obr. 40: Odlitek raketové trysky [31]

## 6.2 Případová studie tavení titanu metodou ISM

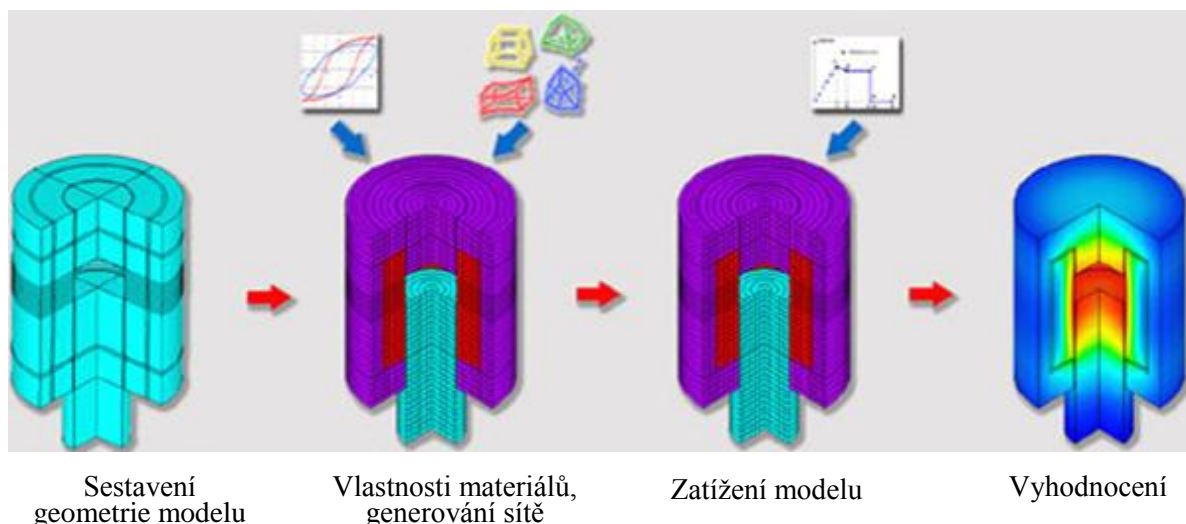
V této kapitole byla provedena studie možností modelování fyzikálních dějů probíhajících při tavně titanu za použití metody konečných prvků (MKP). Metoda MKP se stala jedním z nejzásadnějších výpočetních prostředků v mnoha oblastech při vývoji výrobku, především ve strojírenském a elektrotechnickém průmyslu. Princip metody konečných prvků spočívá v diskretizaci spojitého modelu do určitého počtu prvků a je rozdělen na tři základní fáze – PreProcessing, Solution a PostProcessing. [32] [33]

Fáze PreProcessingu zahrnuje vytvoření CAD modelu, který může být jedno, dvou nebo trojrozměrný. Jednotlivým částem modelu se přiřadí materiálové vlastnosti a následně probíhá diskretizace modelu, kde se nekonečný objem modelu nahradí konečným počtem prvků. V této fázi jsou také zavedeny okrajové podmínky (např. rovnoběžnost magnetických toků, neohraničenost okolního prostoru) a zatížení modelu (napětí, proud, proudová hustota).

Fáze Solution zahrnuje volbu analýzy (harmonická, statická, transientní) a řešiče pro dané fyzikální pole. [32] [33]

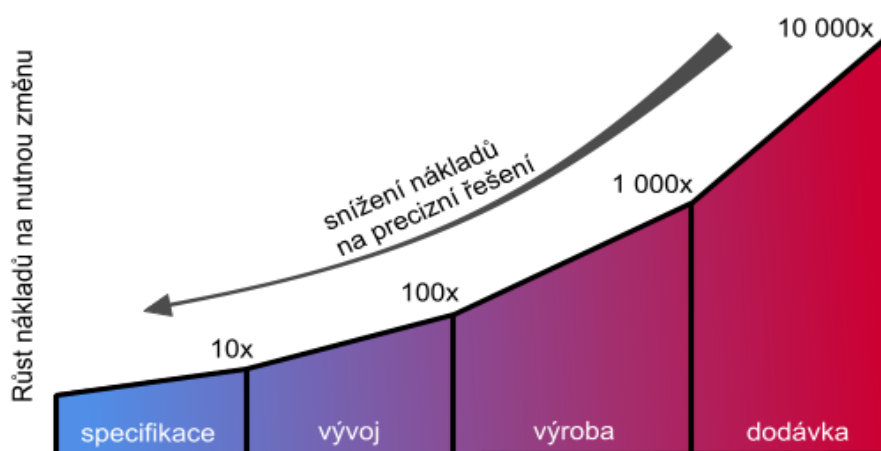
V poslední fázi PostProcessingu je provedeno konečné vyhodnocení řešeného zadání. Většinou se jedná o grafické znázornění důležitých hodnot v navrženém modelu (mapa elektromagnetického pole, závislost elektromagnetických veličin na čase, teplotě apod.).

Základní etapy procesu metody konečných prvků jsou naznačeny na obr. 41. [32] [33]



Obr. 41: Fáze principu MKP [32]

Nasazením metody konečných prvků lze zásadně zkrátit vývojové časy od původního návrhu ke konečnému výrobku. Mezi další přednosti patří snížené výrobní náklady na zavedení výroby, na konstrukční cyklus, zvýšená produktivita a kvalita konečných produktů, inovace a další – obr. 42. [32] [34]

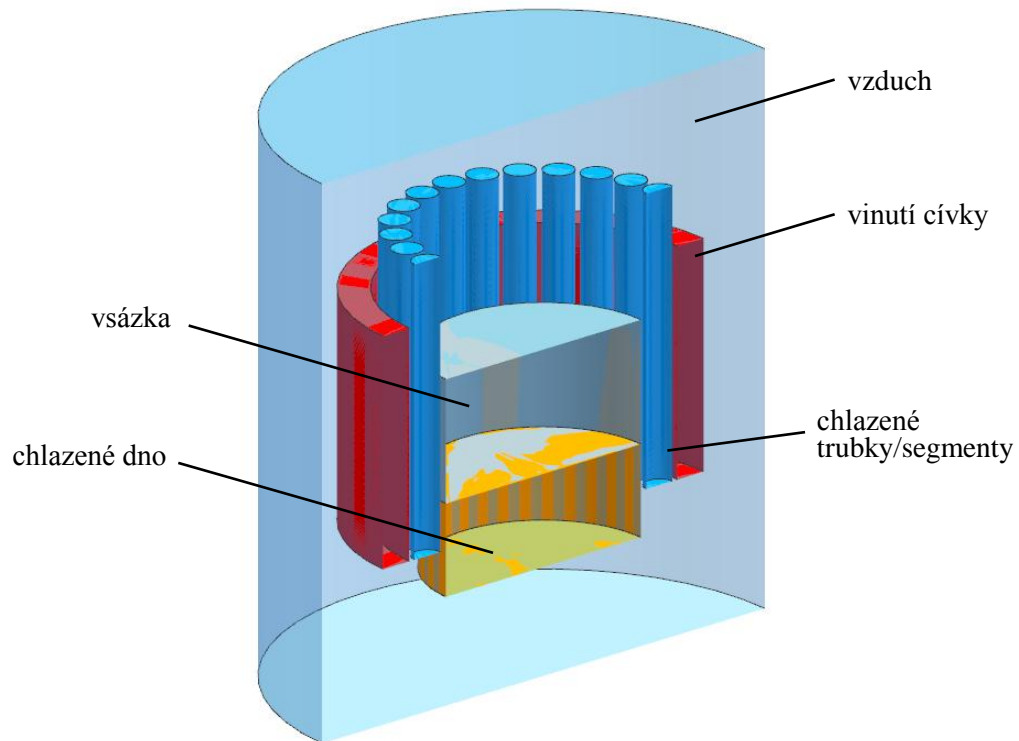


Obr. 42: Fáze výrobku [34]

### 6.2.1 Numerický model

V rámci případové studie tavení titanu metodou ISM byl vytvořen numerický model zařízení v prostředí programu ANSYS. Plně parametrický model a následující výpočty byly generovány pomocí skriptu založeného na jazyce APDL, který je integrován do programu ANSYS.

Uspořádání řešeného problému je patrné z obr. 43. Rozměry zařízení byly shodné jako při analytickém výpočtu parametrů pro tavení  $ZrO_2$  – obr. 33, kap.5.1.6.



**Obr. 43: CAD model studeného kelímku**

Samotný výpočet byl rozdělen na dvě etapy. Nejprve bylo nutné určit rozložení elektromagnetického pole prostřednictvím harmonické analýzy celého zařízení. Následně byly výsledky načteny do teplotně transienční úlohy a byl proveden výpočet rozložení teplot v titanové vsázce v čase  $t = (0; 1200)s$ .

Pro harmonickou analýzu rozložení elektromagnetického pole byly při diskretizaci modelu použity elementy typu tetraedr – SOLID236. Velikost elementů a zadávané elektromagnetické parametry pro jednotlivé části zařízení jsou shrnuty v tab. 9. Pro zjednodušení modelu byly uvažovány konstantní hodnoty elektrické permeability a rezistivity. Velikost elektrické rezistivity pro měď a titan byly pro teploty dané okrajovými podmínkami úlohy určeny na základě vztahu:

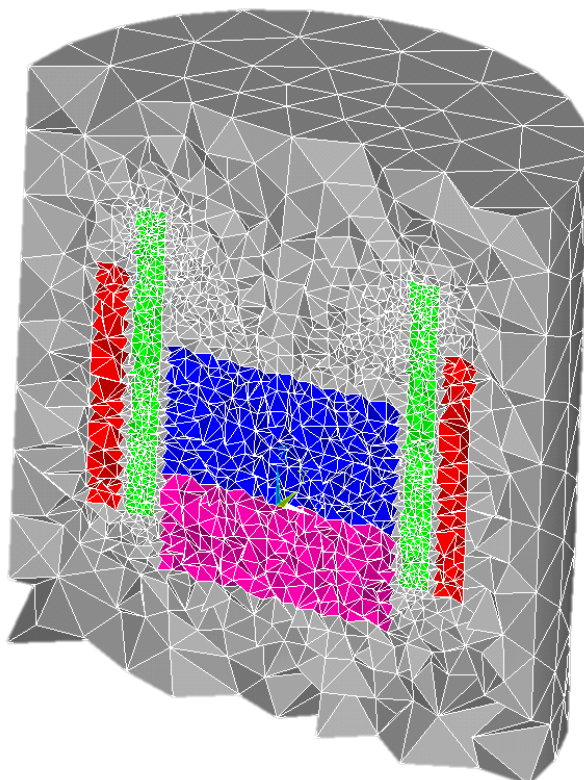
$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \Delta t) \quad , \quad (6.1)$$

kde  $\rho_0$  je odpor materiálu při počáteční teplotě,  $\alpha$  je teplotní součinitel elektrické rezistivity a  $\Delta t$  je rozdíl teplot.

Tab. 9 – Parametry zadané pro elektromagnetickou harmonickou analýzu

Část zařízení	Velikost elementu [mm]	Teplota pro určení elmag. parametrů [°C]	El. Permeabilita [H/m]	El. Rezistivita [ $\Omega$ ]	Proudová hustota [ $A/m^2$ ]	Budicí frekvence [Hz]
Cívka	5	20	1	-	$5 \times 10^6$	30000
Vsázka	5	1668	1	$2,03 \times 10^{-6}$	-	-
Chlazené trubky	2,5	80	1	$2,2 \times 10^{-8}$	-	-
Chlazené dno	5	80	1	$2,2 \times 10^{-8}$	-	-
Okolní vzduch	20	20	1	0	-	-

Velikost proudové hustoty a budicí frekvence byly odhadnuty na základě dostupné literatury (35) a sloužily především ke správnému odladění numerického modelu. Samotná proudová hustota by při zvolených rozměrech cívky odpovídala napájecímu proudu 9000A. Pro další výzkum by tyto veličiny mohly být díky parametrické povaze modelu snadno variovány tak, aby bylo dosaženo optimálního nastavení. Výsledný zdiskretizovaný model při pohledu v řezu je patrný z obr. 44.



Obr. 44: Zdiskretizovaný model studeného kelímku

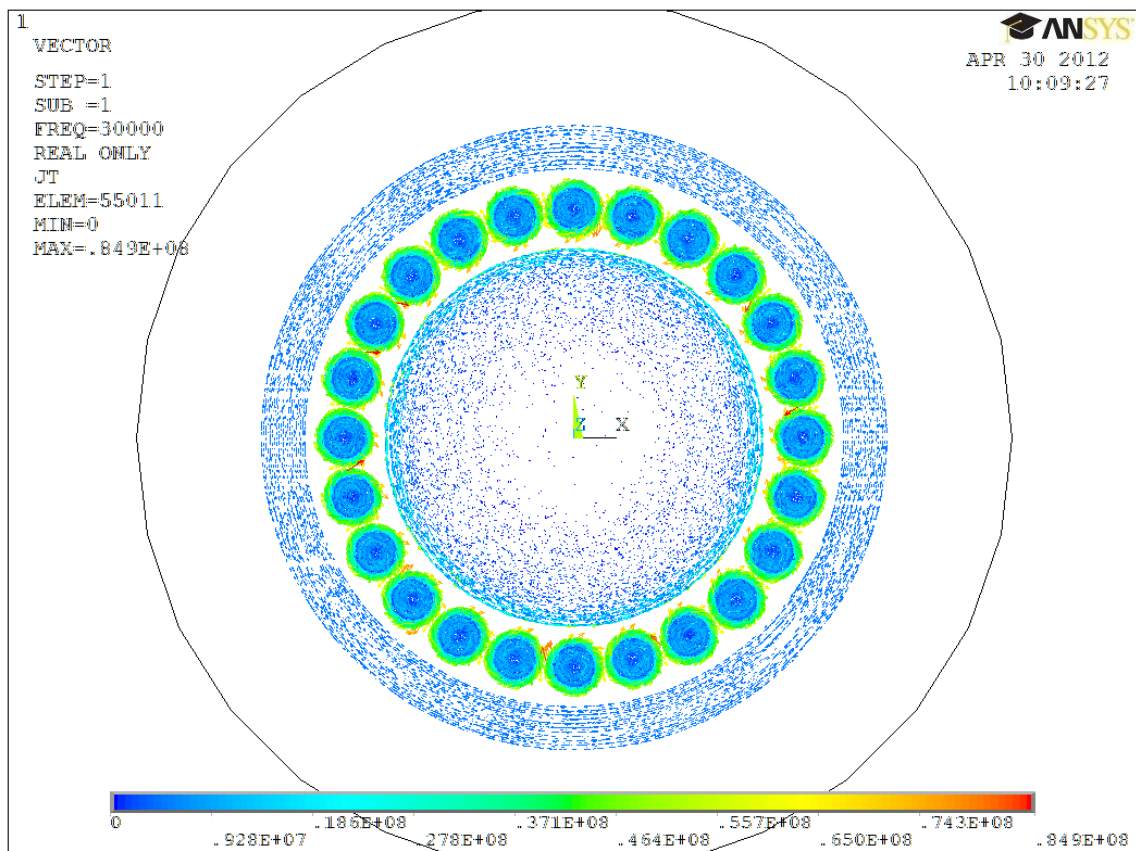
Obdobně byl vytvořen i model pro teplotně tranzientní úlohu, kde bylo nutné použít elementy typu tetraedr – SOLID90. Řešeno bylo rozložení teplot na objemu odpovídajícím materiálu vsázky, přičemž bylo zapotřebí stanovit především koeficienty přestupu tepla  $\alpha$ , dále hustotu titanu  $\rho$ , tepelnou vodivost  $\lambda$  a měrnou tepelnou kapacitu  $c$  – tab. 10.

Tab. 10 – Materiálové parametry titanové vsázky použité pro zadání teplotně tranzientní úlohy

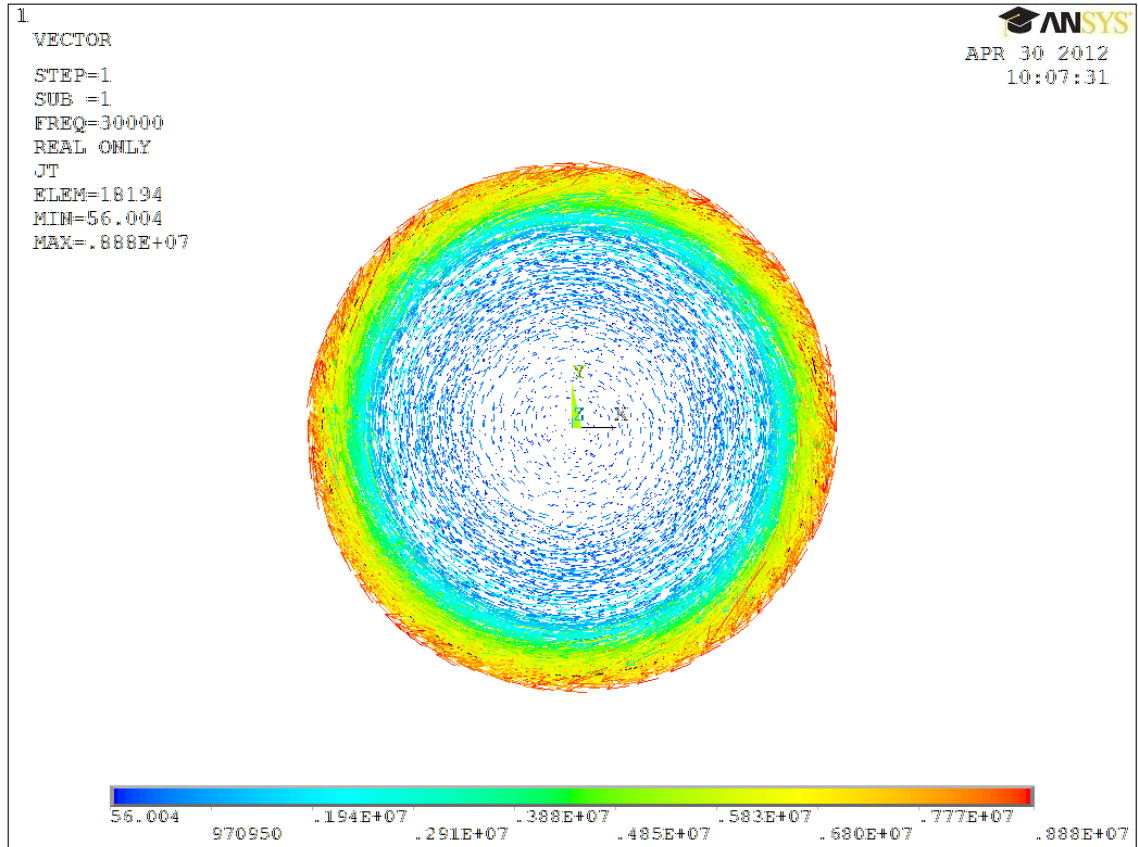
$\alpha_{\text{dno}}$ [W/m <sup>2</sup> K]	$\alpha_{\text{vzduch}}$ [W/m <sup>2</sup> K]	$\rho_{\text{titan}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{\text{titan}}$ [W/(m.K)]	$c_{\text{titan}}$ [J/kg.K]
5000	13	6990	22	522

### 6.2.2 Výsledky numerických analýz

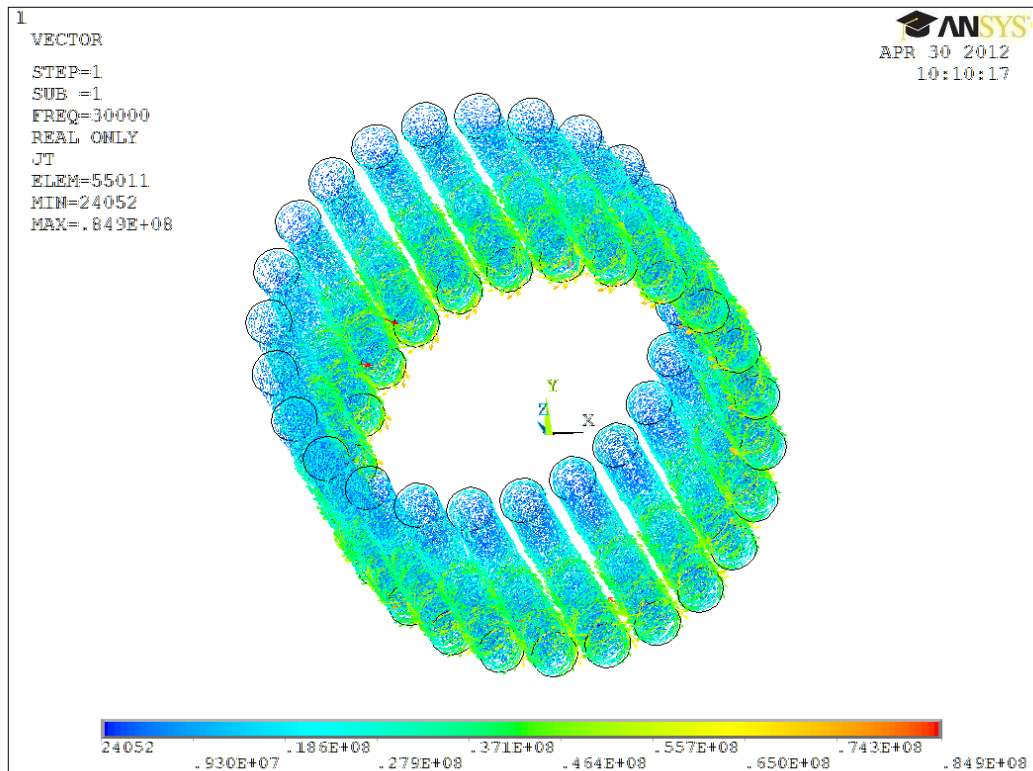
V této kapitole jsou prostřednictvím obrázků prezentovány výsledky numerických analýz zařízení pro tavení metodou studeného kelímku. Řešením elektromagnetické harmonické úlohy bylo získáno především rozložení vektorových veličin: *proudové hustoty*  $\mathbf{J}_T$  a *elektromagnetické indukce*  $\mathbf{B}$  v jednotlivých částech zařízení v ustáleném stavu – obr. 45 až obr. 49. Dále byla získána skalární veličina *hustota Jouleových ztrát*  $J_H$  na tělese vsázky – obr. 50.



Obr. 45: Rozložení proudové hustoty v celém zařízení

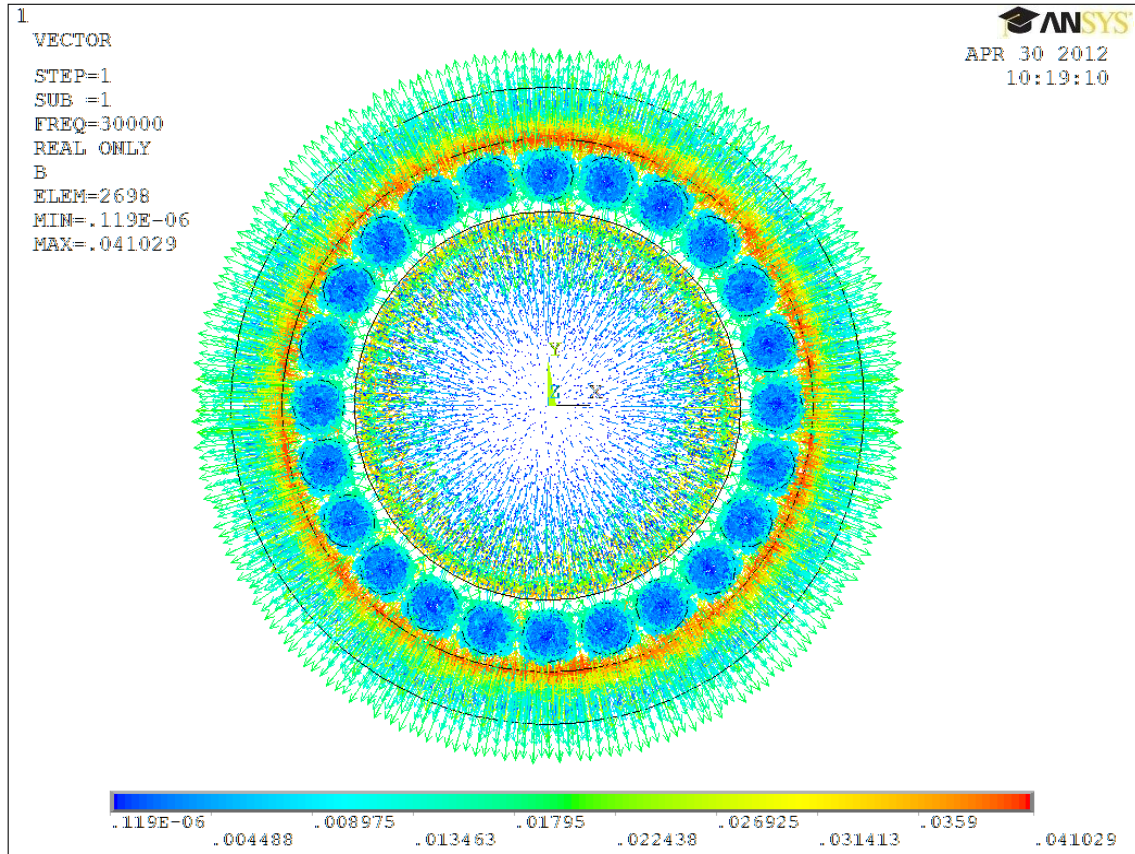


Obr. 46: Rozložení proudové hustoty ve vsázce

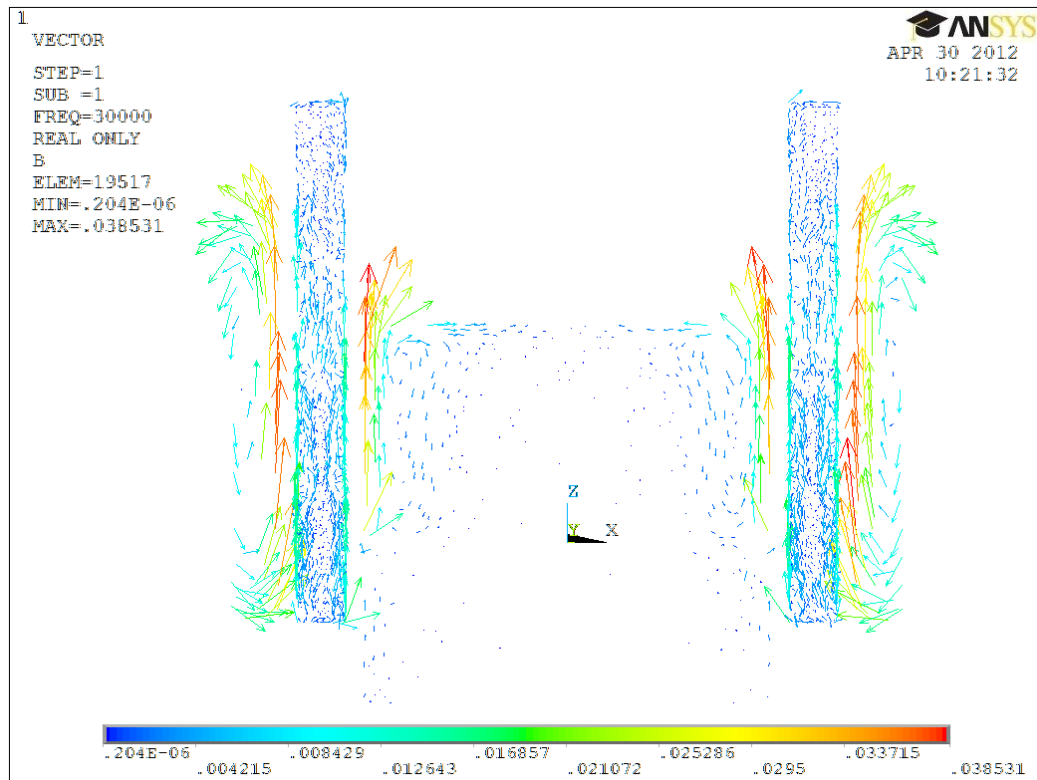


Obr. 47: Rozložení proudové hustoty v chlazených trubkách

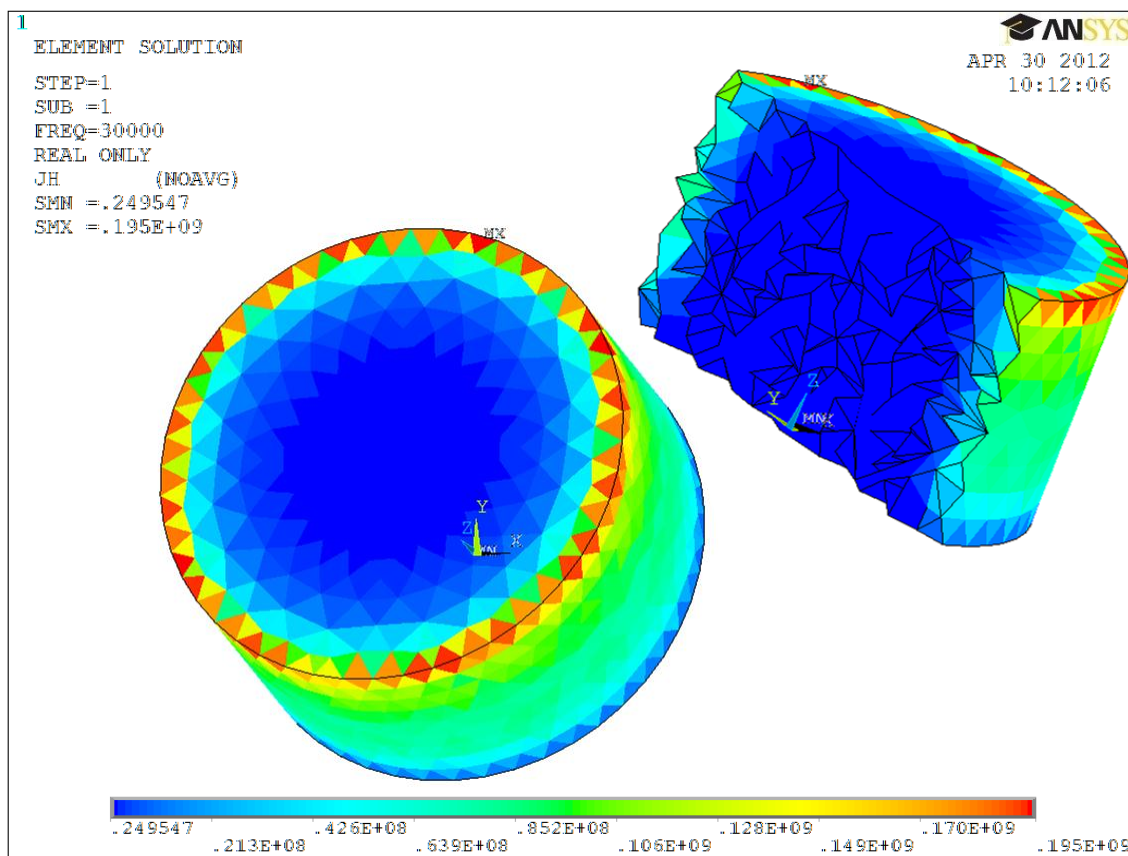




Obr. 48: Rozložení elektromagnetické indukce v celém zařízení

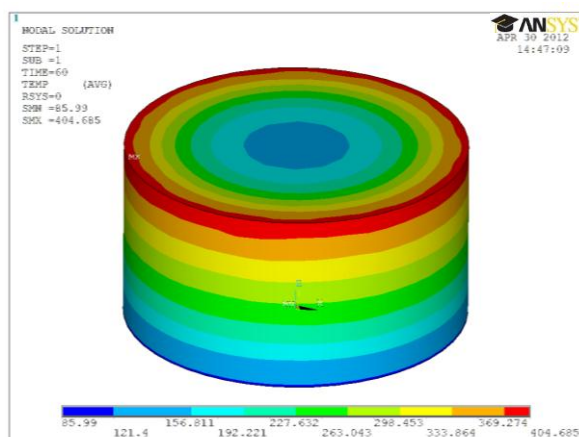
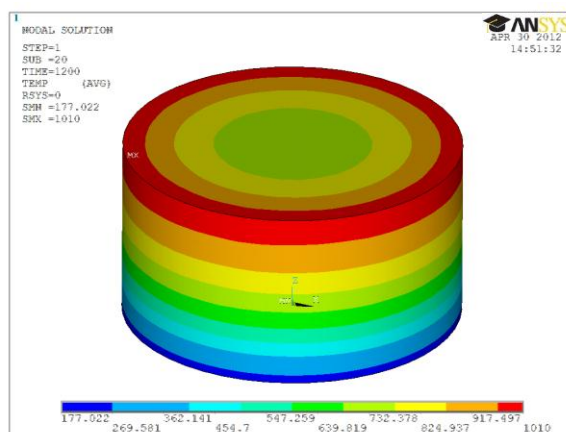


Obr. 49: Rozložení elektromagnetické indukce v celém zařízení v centrálním řezu

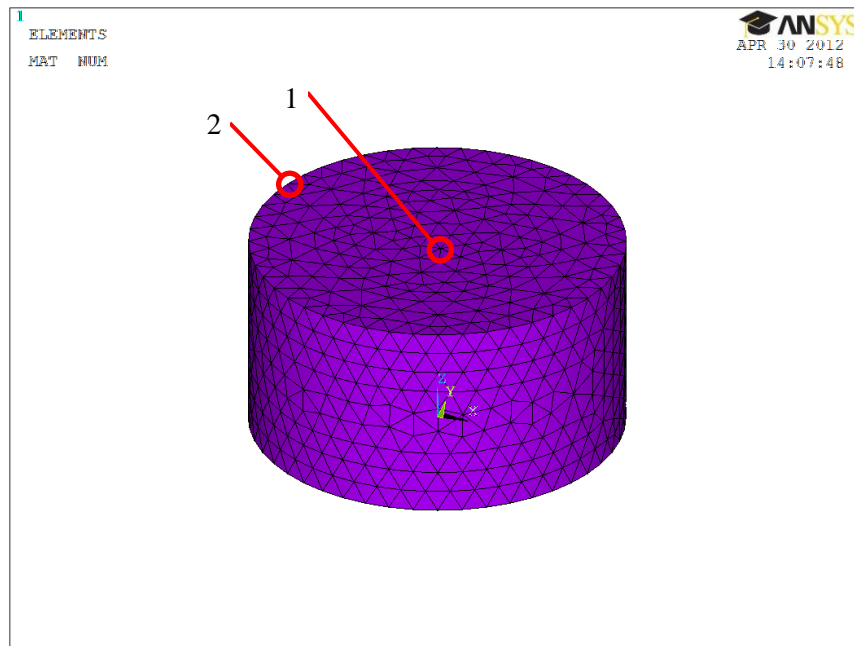


Obr. 50: Rozložení Jouleových ztrát v tělese vsázky

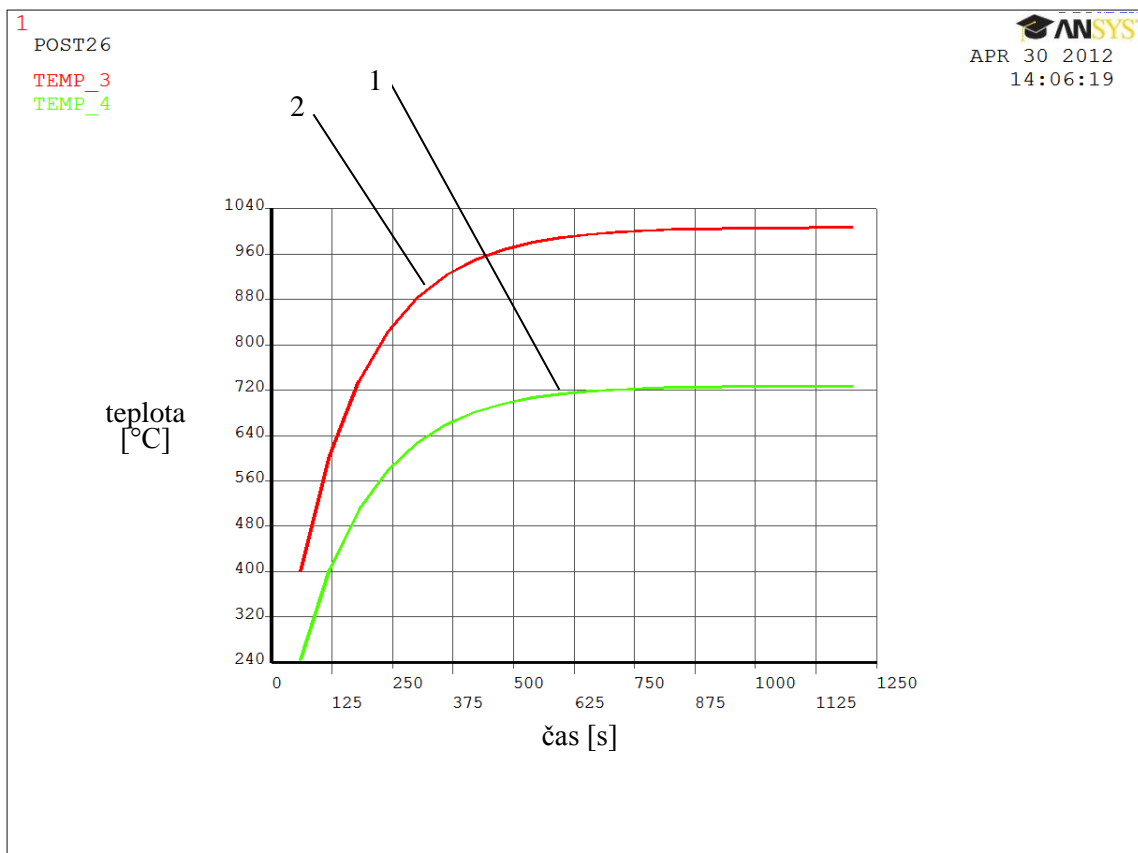
Právě velikosti Jouleových ztrát v jednotlivých uzlech numerického modelu byly následně přeneseny do teplotně tranzientní úlohy, jejímž výsledkem bylo mj. rozložení teploty  $T$  v objemu vsázky v čase  $t = (0; 1200)s$  – obr. 51 a obr. 52.

Obr. 51: Rozložení teploty na tělese vsázky v čase  $t=60s$ Obr. 52: Rozložení teploty na tělese vsázky v čase  $t=1200s$

Pro názornější představu byl vytvořen graf závislosti teploty na čase (obr. 54) ve dvou konkrétních uzlech na volném povrchu vsázky – obr. 53



Obr. 53: Výběr uzlů na tělese vsázky



Obr. 54: Časový průběh teploty ve vybraných uzlech

Z uvedeného grafu je patrné, že po určité době (cca 625s) je změna teploty vsázky velmi malá a ustálí se na konečné hodnotě 1010°C. Při takto nastavené konfiguraci by tedy k tavení titanové vsázky nedocházelo. Pro správnou funkci zařízení by tedy bylo nutné zvýšit napájecí proud nebo budicí frekvenci cívky.

### 6.2.3 Shrnutí numerického modelování ISM

Provedené numerické modelování zařízení studeného kelímku bylo založeno na mnoha zjednodušujících předpokladech. Při elektromagnetické analýze byl uvažován pouze ustálený stav nezahrnující rozběh zařízení. Všechny zadávané elektromagnetické veličiny byly konstantní a nedocházelo k jejich změnám vlivem teploty, což umožnilo řešit dvě oddělené úlohy (elektromagnetismus, teplo); v opačném případě by bylo nutné řešit přinejmenším slabě sdružené úlohy, čímž by se zvýšila náročnost modelu a výpočtový čas. Dále byla zcela ignorována změna tvaru taveniny vlivem elektrodynamických sil. Při řešení transienční tepelné úlohy není možné postihnout promíchávání taveniny, které se podílí na šíření tepla do objemu vsázky.

Na výsledcích elektromagnetické úlohy jsou dobře patrné i některé zajímavé doprovodné jevy, které jsou spojeny s technologiemi indukčního ohřevu. Jedná se především o tzv. *skin effect*, který je charakterizován snahou vytlačit proudovou hustotu směrem k vnějšímu povrchu vodiče při napájení střídavým proudem. *Skin effect* je nejvíce patrný na tělesech vsázky (obr. 46) a chladicích trubek (obr. 47). Ke stejnému jevu by ovšem docházelo i na tělese cívky. Ta však nebyla středem zájmu výpočtu, a tedy u ní nebylo aktivováno zohlednění vířivých proudů, které se na vzniku *skin effectu* podílejí.

Dalším jevem je tzv. *proximity effect*, ke kterému dochází zejména u chladicích trubek zařízení (obr. 47). K tomuto jevu dochází u blízko položených vodičů napájených střídavým proudem. Indukované střídavé magnetické pole vytváří v přilehlých vodičích vířivé proudy, které ovlivní rozložení proudové hustoty uvnitř vodiče. Proudová hustota ve vodiči je koncentrována do oblastí, které jsou nejvzdálenější od přiléhajících vodičů, které přenášejí proud ve stejném směru.

Z výše uvedeného je tedy zřejmé, že proces tavení metodou studeného kelímku je velice složitý a je založen na fyzikálních dějích z oblasti elektromagnetismu, fyzikální metalurgie, termodynamiky, hydrodynamiky a dalších. Nicméně vytvořený model studeného kelímku může sloužit k prvotnímu přiblížení výše uvedených dějů podílejících se na realizaci tavby.

## **7 Závěr**

Při řešení této diplomové práce bylo postupováno metodicky, čemuž odpovídá i zvolené strukturování kapitol. Nejprve byla vypracována rozsáhlá rešerše na dané téma s využitím širokého spektra informačních zdrojů (odborné články, skripta, knihy, web). V tomto ohledu je velmi přínosná služba knihovny na Západočeské univerzitě v Plzni, umožňující studentům přístup k mnoha plnotextovým databázím odborných článků. Ze shromážděných informací vyplývá řada zajímavých poznatků.

Metoda tavení ve studeném kelímku spadá do kategorie technologií řízených elektromagnetickým polem, jejichž základy byly položeny v 50. letech minulého století. Pro jevy vyvolané vnějším elektromagnetickým polem v tekutých kovech se vžil souhrnný název magnetohydrodynamika kovů. Základní principy magnetohydrodynamiky jsou popsány soustavami složitých parciálně-diferenciálních rovnic, přičemž ani stanovení okrajových podmínek potřebných pro jejich řešení není vůbec jednoduché. K řešení těchto sdružených úloh se často v praxi využívá řada specializovaných konečnoprvkových programů. Rozvoj poznání v oblasti fyzikálně-metalurgických vlastností zpracovávaných materiálů doplněný současným intenzivním nárůstem výkonu výpočetní techniky umožňuje optimalizaci parametrů tavicího zařízení pro konkrétní aplikaci, což ve fázi návrhu nového zařízení může vést ke značným úsporám.

V současné době probíhá intenzivní výzkum této technologie na řadě renomovaných pracovišť po celém světě, často založený na experimentálním přístupu. Motivujícím faktem může být například možnost získání vysoce čistého polykrystalického křemíku využívaného ve fotovoltaice nebo jako výchozí suroviny pro IT průmysl. Rovněž příprava a zpracování některých nových žárupevných superslitin by nebyla možná bez přispění ISM. Velmi intenzivně se taktéž studuje možnost využití ISM při zpracování radioaktivního odpadu. Přestože tato metoda tavení patří mezi finančně náročnější technologie, existují již i mnohé praktické případy, kdy je její využití nevyhnutelné. Jedná se zejména o tavení silně reaktivních materiálů (např. titan, zirkon, hliník a některé kovy vzácných zemin) při požadované vysoké čistotě výsledného produktu. Proces tavení metodou ISM vyloučí možnou kontaminaci vsázky materiálem kelímku a navíc je možné proces provádět v ochranné atmosféře. K dokonalé homogenizaci výsledné slitiny přispívá i intenzivní promíchávání taveniny způsobené elektromagnetickými silami.

Metodou ISM lze zpracovávat jak materiály elektricky vodivé, tak i elektricky nevodivé. Obě varianty však mají svá specifika zejména ve startovací fázi procesu tavení. V případě tavení materiálů se špatnou elektrickou vodivostí (oxidy, keramiky, skla) je zapotřebí zvýšit elektrickou vodivost vsázky na potřebnou mez. Toho je docíleno např. přidáním malého objemu vodivého materiálu do vsázky nebo využitím jiného vnějšího zdroje tepla. Přes uvedené obtíže je při tavení materiálů se špatnou elektrickou vodivostí dosahováno vysoké elektrické účinnosti až 90%. U elektricky vodivých materiálů se jedná o účinnost maximálně 50% v důsledku indukovaných vířivých proudů uvnitř vsázky.

V praktické části práce byl proveden souhrn základních znalostí a nástin postupu při stanovení optimálních podmínek pro tavení dvou konkrétních materiálů. Dále byl vytvořen hrubý návrh dispozice zařízení studeného kelímku pro obě varianty. Na příkladu tavení elektricky nevodivého oxidu zirkonu byl demonstrován analytický postup výpočtu, který je založen na využití tzv. náhradního obvodu. V případě tavení elektricky vodivého titanu bylo úspěšně použito modelování metodou konečných prvků pomocí programu ANSYS. V obou případech bylo uvažováno mnoho zjednodušujících předpokladů, bez nichž by řešení bylo velice obtížné, či dokonce nemožné. Správnost výsledků a jejich důvěryhodnost je kromě zmíněných zjednodušení ještě značně ovlivněna dalšími faktory, především pak kvalitou vstupních dat a reálnými okrajovými podmínkami. Návrh technologie ISM tedy musí být bezpodmínečně podložen znalostmi z celé řady oborů, daty z praktických měření a experimentů, ale i empirickými zkušenostmi, které ve většině případů bývají předmětem podnikového know-how.

Především díky cizojazyčné odborné literatuře věnované problematice tavení ve studeném kelímku se v předkládané diplomové práci podařilo shromáždit potřebné množství informací. Tento ucelený přehled doplněný o ukázkou konkrétních výpočtů může být čtenáři praktickou pomůckou nejen pro prvotní seznámení s metodou ISM, ale také pro případný navazující výzkum. Vzhledem k nabízejícím se aplikacím (zpracování jaderného odpadu) je toto téma velice aktuální. Příslibem pro fakultu elektrotechnickou na Západočeské univerzitě v Plzni je probíhající spolupráce s Ústavem jaderného výzkumu v Řeži.

## 8 Použitá literatura

- [1] **Doležal , Ivo, Musil, Ladislav a Ulrych, Bohuš.** Moderní průmyslové technologie založené na procesech v tekutých kovech řízených elektromagnetickým polem. *ELEKTRO*. 2003, Sv. 11, stránky 4-11.
- [2] **Autor neurčen.** Interakce elektromagnetického pole s elektricky vodivými kapalinami. [Online] [Citace: 10. říjen 2011.] <[web.fel.zcu.cz/kte/predmety/jine/EDS/dalsi/COUP7.pdf](http://web.fel.zcu.cz/kte/predmety/jine/EDS/dalsi/COUP7.pdf)>.
- [3] **Rada, J. a kol.** *Elektrotepelná technika*. Praha : SNTL, 1985.
- [4] **Černý, Václav.** Indukční ohřev (3). *ELEKTRO*. 2002, Sv. 12.
- [5] **Šenberger, Jaroslav.** Výroba nelegovaných a legovaných ocelí v elektrických indukčních pecích. [Online] [Citace: 3. říjen 2011.] <[http://www.zam.fme.vutbr.cz/~senberger/doc/prednaska\\_8.doc](http://www.zam.fme.vutbr.cz/~senberger/doc/prednaska_8.doc)>.
- [6] **Mühlbauer, A.** Innovative Induction Melting Technologies: A Historical Review. *Modelling for Material Processing*. 2006.
- [7] Cold Crucible Induction Melting Background and State of the Art. [Online] 2009. [Citace: 15. březen 2012.] <<http://www.fissoreagency.com/pages/wp-content/uploads/2009/09/CCIM.pdf>>.
- [8] **Rot, D. a Kožený, J.** Modelování startu tavby oxidů kovů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku. *Electroscope*. 2010.
- [9] Consarc Engineering Limited - Induction Skull Melting. [Online] [Citace: 10. říjen 2011.] <[http://www.consarceng.com/pages/product\\_induction\\_skull\\_melting.html](http://www.consarceng.com/pages/product_induction_skull_melting.html)>.
- [10] **Reed, Scott.** Induction Skull Melting Offers Ti Investment Casting Benefits. *Industrial Heating*. 2001. Dostupné z webu:<[http://www.industrialheating.com/Articles/Feature\\_Article/a8f55bf8fbbb7010VgnVCM100000f932a8c0\\_\\_\\_\\_](http://www.industrialheating.com/Articles/Feature_Article/a8f55bf8fbbb7010VgnVCM100000f932a8c0____)>.
- [11] **Černý, Václav.** Indukční ohřev (1). *ELEKTRO*. 2002, Sv. 10.
- [12] **Raida, Zbyněk.** Maxwellovy rovnice a jejich řešení. [Online] [Citace: 5. listopad 2011.] <<https://docs.google.com>>

- [13] **Langer, Emil.** *Teorie indukčního a dielektrického tepla.* Praha : Academia, 1979. str. 320.
- [14] **Černý, Václav.** Indukční ohřev (2). *ELEKTRO.* 2002, Sv. 11.
- [15] **Behrens, Torge.** *Prozessorientierte Analyse der induktiven Skull-Melting-Technologie bei Verwendung eines Transistorumrichters.* místo neznámé : G.W.Leibniz Universität Hannover, 2007. Doktorská práce.
- [16] **КУЗЬМИНОВ, Юрий, ЛОМОНОВА, Елена а ОСИКО, Вячеслав.** *Тугоплавкие материалы из холодного тигля.* Москва : Наука, 2004. str. 376 .
- [17] **ПЕТРОВ, ЮБ а РАТНИКОВ, ДГ.** *Холодные тигли.* Москва : Metallurgiya, 1972. str. 112.
- [18] **Nacke, B., a další, a další.** Skull Melting Technology for Oxides and Glasses. *Electromagnetic processing of materials.* 2005.
- [19] **Umbrashko, Andrejs, a další, a další.** Experimental investigations and numerical modelling of the melting process in the cold crucible. CO. [Online] 2005. [Citace: 8. únor 2012.] <[http://www.modlab.lv/publications/2005/Padova\\_LES.pdf](http://www.modlab.lv/publications/2005/Padova_LES.pdf)>.
- [20] **Pozniak, I.** *Workshopy pořádané katedrou KEE na ZČU v Plzni.* Plzeň : ZČU, 2011-2012.
- [21] **Nieman, Benjamin, Nacke, Bernard a Kudryash, Maxim.** New innovative induction system for the production of pure high temperature glasses. *Germany: Institute for Electrothermal Processes.* [Online] 2008. [Citace: 6. listopad 2011.] <[http://www.leonardo-energy.org/webfm\\_send/43](http://www.leonardo-energy.org/webfm_send/43)>.
- [22] **Nacke, Bernard.** Recent research at the institute of electrotechnology in the field of electromagnetic processing of materials. *Germany : Institute of Electrotechnology (ETP).* [Online] [Citace: 8. listopad 2011.] <<http://80.ieeexplore.ieee.org/dialog/cvut.cz:80/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5167854>>.
- [23] **Ginterová, Monika.** Podivuhodný kelímek. 3pól. [Online] 2004. [Citace: 10. leden 2012.] <<http://3pol.cz/232-podivuhodny-kelimek>>.
- [24] **Wikipedia.** Skull crucible - Wikipedia, the free encyclopedia. *Skull crucible.* [Online] [Citace: 8. únor 2012.] <[http://en.wikipedia.org/wiki/Skull\\_crucible](http://en.wikipedia.org/wiki/Skull_crucible)>.



- [25] **Vaško, Michal.** *Odlévání turbínových kol ze slitin TiAl.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. str. 28. Bakalářská práce.
- [26] **Šupálek, Milan.** *Přesné lití turbínových kol turbodmychadel ze slitin TiAl.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. str. 80.
- [27] **Hlavatý, Ivo.** Ivo Hlavaty, VSB - TU Ostrava. *Laserové a plazmové řezání (84,83).* [Online] [Citace: 8. leden 2012.] [homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf](http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf).
- [28] **Ciszek, Ted.** Siliconsultant silicon crystal growth consultant for materials, defects and impurities and Si photovoltaics consulting services. *Electromagnetic Casting.* [Online] [Citace: 19. březen 2012.] <<http://www.siliconsultant.com/EMC.htm>>.
- [29] Materiálová věda. *Kde se bere monokrystalický křemík? Tažení monokrystalů křemíku Czochralského metodou.* [Online] [Citace: 2. 4. 2012.] <http://materialovaveda.blogspot.com/2011/07/kde-se-bere-monokrystalicky-kremik.html#comment-form>.
- [30] Skull Melting. *Skull Melting Process.* [Online] [Citace: 15. leden 2012.] <<http://www.theimage.com/newgems/synthetic/syntheticanimate3.html>>.
- [31] **Broihanne, Georges.** New Spin on Titanium Casting Technology. [Online] [Citace: 27. listopad 2011.] <<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=286>>.
- [32] **Kačor, Petr.** Metoda konečných prvků v elektrotechnické praxi. [Online] [Citace: 15. únor 2012.] <[http://homen.vsb.cz/~kac37/\\_num\\_met\\_Kacor/#lit2](http://homen.vsb.cz/~kac37/_num_met_Kacor/#lit2)>.
- [33] **Wikipedie.** Metoda konečných prvků. [Online] [Citace: 15. únor 2012.] <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda\\_kone%C4%8Dn%C3%BDch\\_prvk%C5%AF](http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_kone%C4%8Dn%C3%BDch_prvk%C5%AF)>.
- [34] **Fořt, Petr a Kletečka, Jaroslav.** Autodes Inventor a týmové řešení projektů, 2.díl. [Online] [Citace: 15. únor 2012.] <<http://www.designtech.cz/c/plm/tymove-reseni-projektu-2-dil.htm>>.
- [35] **ALD Vacuum Technologies GmbH.** ALD Vacuum Technologies. *Vacuum Precision Casting.* [Online] květen 2011. [Citace: 7. květen 2012.] [http://web.ald-vt.de/cms/fileadmin/pdf/prospekte/Titanium\\_Vacuum\\_Precision\\_Casting\\_en.pdf](http://web.ald-vt.de/cms/fileadmin/pdf/prospekte/Titanium_Vacuum_Precision_Casting_en.pdf).