

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

TAVENÍ MATERIÁLŮ VE STUDENÉM KELÍMKU

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

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

Jméno a příjmení: **Jiří TOPINKA**
Osobní číslo: **E12B0244P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Tavení materiálů ve studeném kelímku**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Objasněte fyzikální princip tavení materiálů elektromagnetickou indukcí.
2. Popište tavení ve studeném kelímku, přednosti, nevýhody.
3. Stanovte předpoklady pro efektivní tavení elektricky vodivých a elektricky nevodivých materiálů ve studeném kelímku.
4. Uvedte praktické aplikace tavení ve studeném kelímku.
5. Provedte hodnocení provozu studeného kelímku kritériem 3E .

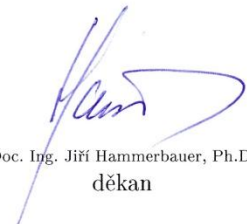


Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá tavením elektricky vodivých, i elektricky nevodivých materiálů metodou studeného kelímku. Je popsáno konstrukční řešení všech komponent studeného kelímku, jsou uvedena různá provedení v závislosti na taveném materiálu. Dále je vysvětlen princip elektromagnetické indukce a ohřevu, skin efekt a elektromagnetická průzařnost. Technologie studeného kelímku je srovnána s ostatními typy zařízení pro elektrický ohřev, je uvedena účinnost.

Klíčová slova

Maxwellovy rovnice, elektromagnetické vlnění, elektromagnetická průzařnost, studený kelímek, induktor, segmentový kelímek, induktorový kelímek, vysokofrekvenční zdroj napájení, chladicí systém, off-gas systém, vitrifikace

Abstract

Presented bachelor's thesis describes melting of electrically conductive and electrically nonconductive materials by cold crucible induction melting method. Constructional solutions of all components of cold crucible are stated, along with principles of skin-effect, electromagnetic induction, transparency effect, and efficiency. Technology of cold crucible melting is compared with others electrical melting devices.

Key words

Maxwell's equations, electromagnetic waves, electromagnetic transparency effect, cold crucible, induktor, segment cold crucible, induktor cold crucible, high frequency power supply, cooling system, off-gas system, vitrification

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 1.6.2015

Jiří Topinka

Poděkování

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

OBSAH

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
0. ÚVOD	10
1. TEORIE ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE	11
1.1. MAXWELLOVY ROVNICE	11
1.2. POYINTINGŮV VEKTOR	12
1.3. HLOUBKA VNIKU ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ	13
1.4. VLNOVÉ ROVNICE ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE	14
1.5. VÁLCOVÉ ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ	15
1.6. ELEKTROMAGNETICKÁ PRŮZAŘNOST	16
2. TECHNOLOGIE ICCM, STUDENÝ KELÍMEK	17
2.1. STUDENÝ KELÍMEK	17
2.2. PROVEDENÍ STUDENÉHO KELÍMKU	18
2.3. INDUKTOR	20
2.4. CHLADÍCÍ SYSTÉM	22
2.5. ELEKTRICKÉ NAPÁJENÍ	22
2.6. ELEKTROMAGNETICKÉ STÍNĚNÍ STUDENÉHO KELÍMKU	24
2.7. OFF-GAS SYSTÉM	25
2.8. ZPRACOVÁNÍ TAVENINY, FEED SYSTÉM	25
3. TAVENÍ ELEKTRICKY VODIVÝCH MATERIÁLŮ	27
3.1. TAVENÍ TITANU A JEHO SLITIN	27
3.2. ČIŠTĚNÍ TITANU OD NEŽÁDOUCÍCH PŘÍMĚSÍ	30
4. TAVENÍ BĚŽNĚ ELEKTRICKY NEVODIVÝCH MATERIÁLŮ	31
4.1. ZAHÁJENÍ TAVENÍ, PŘEDEHŘÍVACÍ PROCES VSÁZKY	31
4.2. CHLAZENÍ PŘETAVENÉ VSÁZKY OXIDŮ A SKEL, RŮST KRYSTALŮ	32
4.3. VYSOKOTEPLTNÍ SYNTÉZA OXIDŮ	35
4.4. VÝROBA KERAMIKY A TEPELNĚ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ	36
4.5. TAVENÍ SKEL VE STUDENÉM KELÍMKU	36
4.6. VITRIFIKACE ODPADU POMOCÍ STUDENÉHO KELÍMKU	37
5. HODNOCENÍ METODY STUDENÉHO KELÍMKU	40
6. ZÁVĚR	42
7. ZDROJE A LITERATURA	43

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Popis	Jednotka
E	Intenzita elektrického pole	V/m
H	Intenzita magnetického pole	A/m
D	Elektrická indukce	C/m ²
B	Magnetická indukce	T
I	Elektrický proud	A
U	Elektrické napětí	V
J	Proudová hustota	A/m ²
S	Poyntingův vektor	W/m ²
a	Hloubka vniku elmag. vlnění	m
d	Průměr válcové vsázky	m
P	Elektrický výkon	W
m	Hmotnost (vsázky)	kg
Q	Elektrický náboj	C
V	Objem	m ³
k	Konstanta šíření vlnění	-
f	Frekvence	Hz
e	Eulerovo číslo	-
T	Teplota	°C
η	Účinnost	-
Φ	Magnetický tok	Wb
μ _r	Relativní permeabilita	-
μ ₀	Permeabilita vakua	H/m
α	Poměr hloubky vniku a průměru vsázky	-
ε ₀	Permitivita vakua	F/m
ε _r	Relativní permitivita	-

0. Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na tavení materiálů ve studeném kelímku. Cílem této práce je popsání této technologie, jejích výhod a nevýhod, uvedení příkladů realizace tavení ve studeném kelímku v praxi, a zhodnocení celého provozu kritériem 3E.

Přestože princip tavení materiálů elektrickým proudem byl znám již v 19. století, až v roce 1887 S. de Ferranti popsal princip indukční pece na tavení kovů, a v následujících několika desetiletích došlo k mnohým vylepšením této technologie. První použitelnou indukční pec sestavil roku 1899 F.A. Kjellin – tato pec byla konstruována na 50 kg vsázky oceli a potřebovala 7000 kWh tavicí energie na tunu vsázky. Počátkem 20. Století, roku 1905 získal E. Saladin patent popisující elektrickou indukční pec pro vysoké frekvence, a na tavení kovů ve vodou chlazeném kelímku byl vydán patent v roce 1931 firmě Siemens & Halske.[4]

K největšímu vývoji u této technologie pak došlo v druhé polovině století dvacátého. Velkou výhodou tohoto způsobu tavení je možnost tavit materiály, které mají vysoký bod tání – například slitiny titanu, zirkonia. Dále také vysoká výsledná čistota tavených materiálů. Toho se využívá v širokém spektru odvětví - od automobilového průmyslu, přes energetiku, zdravotnictví, až po vesmírné programy. V neposlední řadě je výhodou dobrá účinnost celého zařízení při tavení málo elektricky vodivých materiálů, jako např. skel a oxidů. [2],[3],[4]

(pozn.: Pokud není za odstavcem uveden zdroj, platí pro tento odstavec odkaz na zdroj odstavce následujícího.)

1. Teorie elektromagnetického pole a vzniku tepla elektromagnetickou indukcí

1.1 Maxwellovy rovnice

Elektromagnetické pole je popsáno Maxwellovými rovnicemi. Maxwellovy rovnice popisují vzájemnou provázanost veličin elektrického a magnetického pole, vyjadřují skutečnost, že elektrické a magnetické pole tvoří jediný fyzikální celek, který nazýváme elektromagnetické pole. Lze je zapsat buď v integrálním, nebo diferenciálním tvaru. V integrálním tvaru popisují elektromagnetické pole v jisté oblasti, kdežto v diferenciálním tvaru v určitém bodu této oblasti. K popisu elektromagnetického pole se využívají základní veličiny definované v těchto polích, elektrická a magnetická intenzita a indukce (E , H , D , B). Vektory intenzity elektrického a magnetického pole \mathbf{E} , \mathbf{H} jsou na sebe vzájemně kolmé. [1]

$$\oint_c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = J + \frac{d\Psi}{dt} \quad (1.1.1)$$

$$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d\phi}{dt} \quad (1.1.2)$$

$$\oint_A \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} = Q \quad (1.1.3)$$

$$\oint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (1.1.4)$$

První Maxwellova rovnice (1.1.1) (neboli zákon celkového proudu) říká, že cirkulace vektoru \mathbf{H} po libovolně orientované uzavřené křivce c je rovna součtu celkového vodivého proudu I a posuvného proudu, spřaženého křivkou c . Křivka c a libovolná plocha A , jež křivku obepíná, jsou vzájemně orientovány pravotočivě. Druhá Maxwellova rovnice (1.1.2) (neboli zákon elektromagnetické indukce) pak říká, že cirkulace vektoru \mathbf{E} po libovolně orientované

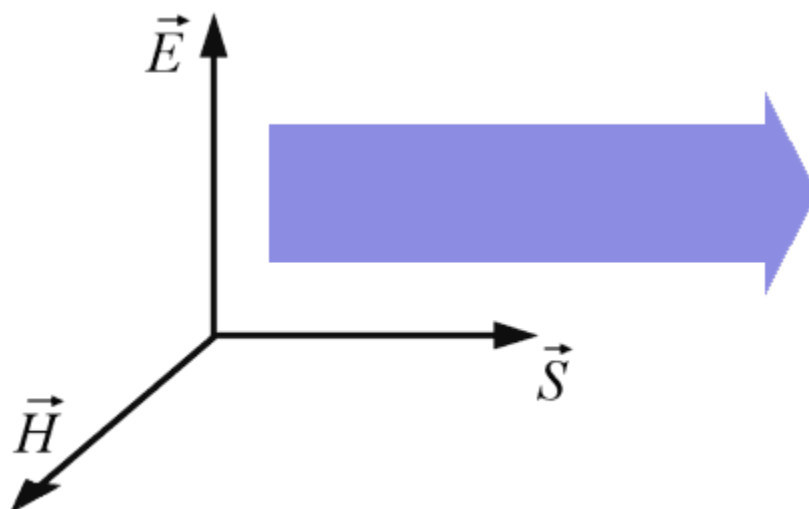
uzavřené křivce c je rovna záporně vzaté časové derivaci magnetického indukčního toku spřaženého křivkou c . Křivka c a libovolná plocha A , jíž křivka obepíná, jsou vzájemně orientovány pravotočivě. Třetí Maxwellova rovnice (1.1.3) (Gaussův zákon elektrostatiky) uvádí, že elektrický indukční tok libovolnou vně orientovanou plochou A je roven celkovému volnému náboji v prostorové oblasti V ohraničené plochou S . Čtvrtá Maxwellova rovnice (1.1.4) (Zákon spojitosti indukčního toku) pak říká, že magnetický indukční tok libovolnou uzavřenou orientovanou plochou A je roven nule. [5],[6]

1.2 Poyntingův vektor

$$\mathbf{S} = [\mathbf{E} \times \mathbf{H}] \quad [W/m^2] \quad (1.2.1)$$

Poyntingův zářivý vektor \mathbf{S} je vektorový součin vektorů intenzity elektrického a magnetického pole. Vektory intenzity elektrického pole \mathbf{E} a magnetického pole \mathbf{H} jsou kolmé k sobě i ke směru šíření elektromagnetické vlny. Vektory \mathbf{E} , \mathbf{H} a \mathbf{S} tvoří pravotočivou soustavu a Poyntingův vektor je kolmý na rovinu, v níž leží \mathbf{E} , \mathbf{H} . Poyntingův vektor představuje tok zářivé energie jednotkou plochy za jednotku času. Jeho velikost je rovna ploše obdélníka se stranami E a H . Celkový výkon vycházející z tělesa o objemu V je dán rovnicí:[1]

$$\int_V \operatorname{div}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dV = \int_V \operatorname{div} \mathbf{S} dV = \oint_A \mathbf{S} \cdot d\mathbf{A} \quad (1.2.2)$$

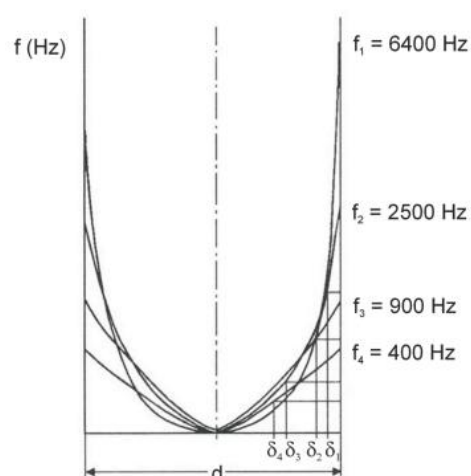
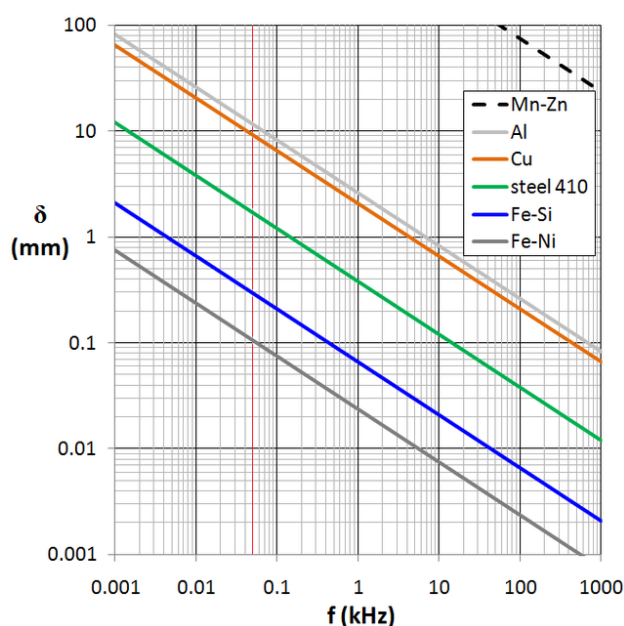


Obr.1: Poyntingův vektor \mathbf{S} [7]

1.3 Hloubka vniku elektromagnetického záření

Správnou volbou kmitočtu proudu v induktoru lze docílit vhodného rozložení tepla ve vsázce, což dává široké možnosti využití indukčního ohřevu (tavení vsázky, kalení povrchu, žíhání, apod.). Pronikající elektromagnetické vlnění se ale ve vsázce utlumuje, hloubka vniku vlnění do elektricky vodivého prostředí závisí na kmitočtu proudu induktorem, permeabilitě a konduktivitě vsázky. Hloubka vniku je definována jako hloubka pod povrchem vodiče (vsázky), kde proudová hustota klesne na $1/e$ (asi na 37% proudové hustoty J na povrchu vodiče).[1],[4],[9]

$$a = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \cdot \mu \cdot \gamma}} \quad (1.3.1)$$



Obr. 1.3.2: Vliv hloubky vniku pro vodič o průměru „ d “. [1]

Obr. 1.3.1: Závislost hloubky vniku na frekvenci pro určité materiály. [8]

1.4 Vlnové rovnice elektromagnetického pole

Při průchodu proudu rovinným zářičem vzniká v jeho okolí rovinné elektromagnetické vlnění, pro válcovou cívku pak platí, že vyzařuje do své dutiny válcové elektromagnetické vlnění. Podle konfigurace pole ve vsázce může být elektromagnetické vlnění podélné nebo příčné, podle prostředí, kterým se vlna šíří, elektricky vodivé nebo nevodivé.

Vlnové rovnice harmonického elektromagnetického pole se získají transformací Maxwellových rovnic na rovnice, které budou vyjádřeny pouze jednou proměnnou složky intenzity elektromagnetického pole, tj. buď elektrickou \mathbf{E} , nebo magnetickou \mathbf{H} . Vlnové rovnice pro časově harmonický průběh obou složek pak vyjadřují šíření magnetické a elektrické složky stejné harmonické vlny v elektricky libovolném prostředí.

$$\nabla^2 \mathbf{H} + (\omega^2 \varepsilon \mu - j \omega \gamma \mu) \mathbf{H} = \nabla^2 \mathbf{H} + \mathbf{k}^2 \mathbf{H} = 0 \quad (1.4.1)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} + (\omega^2 \varepsilon \mu - j \omega \gamma \mu) \mathbf{E} = \nabla^2 \mathbf{E} + \mathbf{k}^2 \mathbf{E} = 0 \quad (1.4.2)$$

\mathbf{E}, \mathbf{H} jsou to rotující fázory v komplexní rovině, pro které platí

$$\mathbf{E} = E_m e^{j\omega t}, \quad \mathbf{H} = E_m e^{j\omega t} \quad (1.4.3)$$

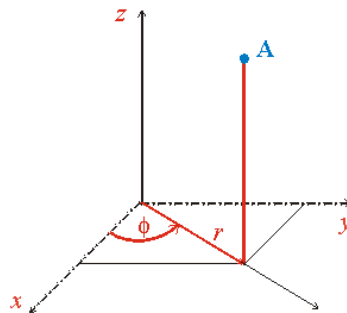
Elektrické vlastnosti prostředí a úhlová rychlost vlnění jsou souhrnně uvedeny v konstantě šíření vlnění k , tzv. vlnové číslo. Vlnové číslo je všeobecně komplexním číslem, tj. má reálnou a imaginární složku. Reálná složka vlnového čísla α se nazývá fázová konstanta a imaginární složka β je činitel tlumení.[1]

$$\mathbf{k}^2 = (\omega^2 \varepsilon \mu - j \omega \gamma \mu) = -j \omega \mu (\gamma + j \omega \varepsilon) \quad (1.4.4)$$

$$\mathbf{k} = \sqrt{-j \omega \mu (\gamma + j \omega \varepsilon)} = \alpha - j \beta \quad (1.4.5)$$

1.5 Válcové elektromagnetické vlnění

Válcové elektromagnetické vlnění vzniká v dutině válcové cívky protékané střídavým proudem. Indukované vířivé proudy se v tomto souosém systému uzavírají po obvodu vsázky v rovinách kolmých na společnou osu cívky a vsázky. Hustota proudu se zmenšuje směrem k této ose. V důsledku utlumování vlnění ve vodivé vsázce směrem k ose dochází ke zmenšování magnetické složky intenzity pole z maximální hodnoty na povrchu vsázky na minimální hodnotu v ose vsázky. V tomto uspořádání je axiální (podélné) magnetické pole a radiální elektrické pole. Pro válcové elektromagnetické vlnění je vhodné zavést válcovou soustavu souřadnic (r, φ, z) namísto kartézských souřadnic (x, y, z) . [1]



Obr. 1.5.1: Válcový souřadný systém. [10]

Pro válcové elektromagnetické vlnění se vyjadřují rovnice v cylindrických souřadnicích a pro jednorozměrnou úlohu se použije transformace

$$\nabla^2 = \frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \quad (1.5.1)$$

vlnové rovnice válcové elektromagnetické vlny pro všeobecné prostředí mají pak tvar: [1]

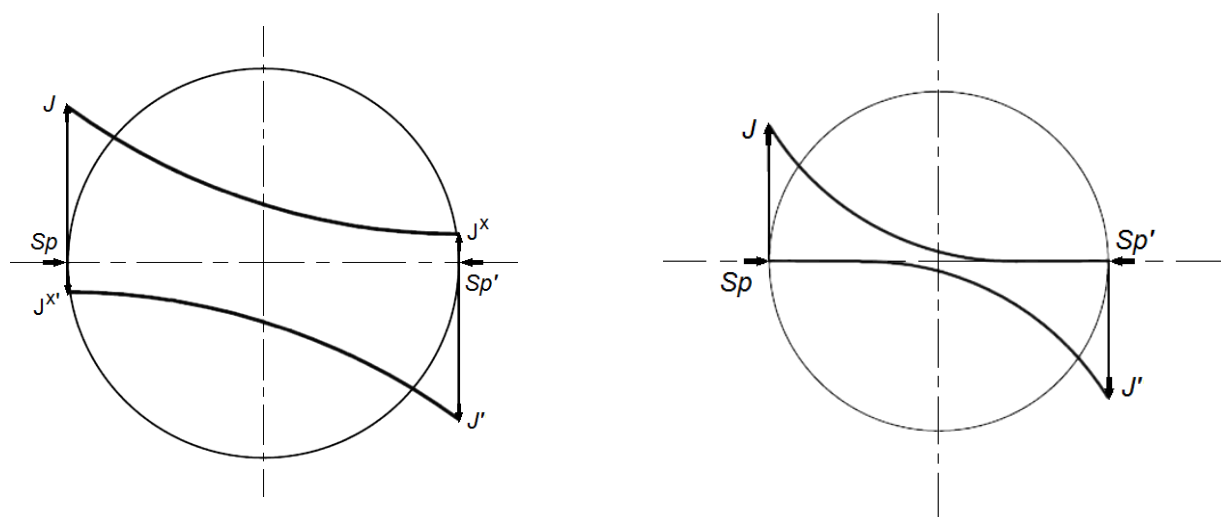
$$\frac{d^2 \mathbf{H}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\mathbf{H}}{dr} + \mathbf{k}^2 \mathbf{H} = 0 \quad (1.5.2)$$

$$\frac{d^2 \mathbf{E}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\mathbf{E}}{dr} + \mathbf{k}^2 \mathbf{E} = 0 \quad (1.5.3)$$

1.6 Elektromagnetická průzařnost

$$\alpha = \frac{d}{a} \quad (1.6.1)$$

Elektromagnetická průzařnost je jev, který nastává při špatně zvoleném kmitočtu pro danou vsázku u indukčního zařízení. Mějme průměr vsázky (d), hloubku vniku (a) a koeficient α . Pro „ $d = 2 \cdot a$ “ (tedy $\alpha = 2$) absorbuje stěna přibližně 80% výkonu, který by jinak absorbovala stěna teoreticky nekonečně tlustá úplně. Avšak pokud bude platit $d < a$ ($\alpha < 1$), stane se stěna průzařnou a nebude absorbovat výkon – elektromagnetické vlnění (složka postupná a odražená) se vzájemně vyruší, protože se nestačilo ve slabé stěně utlumit. Lze tento jev odstranit volbou vyššího kmitočtu pro indukční zařízení, kdy klesne hloubka vniku ve vsázce, zvedne se činitel α a dojde k vymizení průzařnosti.[11]

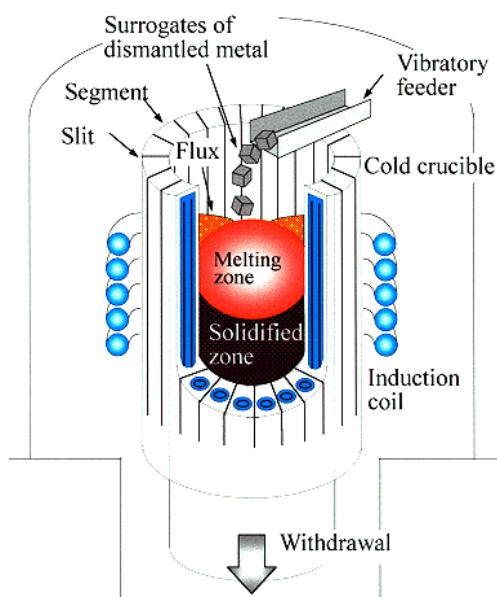


Obr. 1.6.1: Řez válcovou vsázkou, pohled shora. Elektromagneticky průzařná válcová vsázka (vlevo) a neprůzařná válcová vsázka (vpravo).[12]

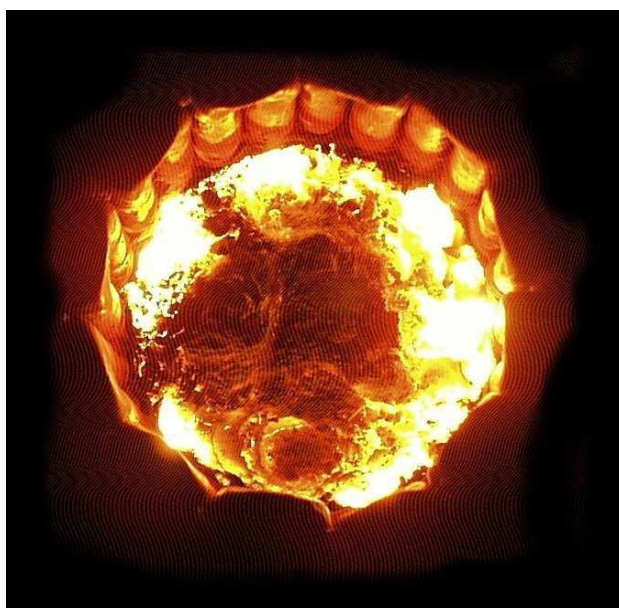
2. Technologie ICCM, Studený kelímek

2.1. Studený kelímek

Studený kelímek je indukční zařízení pro tavení materiálů, jak elektricky vodivých (různé slitiny kovů), tak pro elektricky nevodivé nebo málo vodivé materiály (typicky skla, oxidy různých prvků). Studený kelímek funguje na principu elektromagnetické indukce, kdy induktor vytváří elektromagnetické pole zpravidla vyšších frekvencí (až do cca 50MHz), které pomocí vířivých proudů ohřívá vsázku, která funguje jako sekundární vinutí o jednom závitě u vzduchového transformátoru. Samotný kelímek, ve kterém je vsázka umístěna, může být tvořen buď přímo induktorem, který je intenzivně chlazený vodou, nebo induktor a kelímek tvoří dva samostatné objekty, přičemž i zde platí, že se musí oba nuceně chladit vodou.[1],[15]



Obr. 2.1.1: Schéma jednotlivých částí studeného kelímku. [13]



Obr. 2.1.2: Pohled do studeného kelímku s roztavenou vsázkou. [14]

Teplo způsobené střídavým magnetickým polem vzniká přímo ve vsázce, přenos tepla se tedy neděje tepelným spádem, a celý proces je poměrně rychlý, což je velká výhoda. Vlivem chlazení kelímku vzniká na povrchu taveného materiálu krusta o tloušťce několika milimetrů (tzv. „skull“). Další výhodou je, že vhodnou volbou kmitočtu zdroje lze měnit rozložení tepla v objemu vsázky. Dnešní konstrukce umožňují pracovat s teplotami až 3000°C při hmotnosti vsázky v jednotkách kilogramů a příkonu celého zařízení až stovek kW.[15],[1]

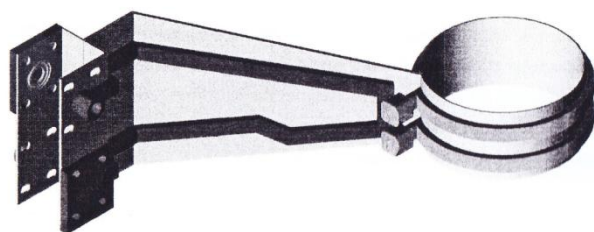
2.2 Provedení studeného kelímku

a) Induktorový kelímek

Samotný kelímek je tvořen pásem materiálu, který se chová jako cívka o jednom závitě a je vnitřně chlazen (Obr. 2.2.2). Tato konstrukce se používá hlavně pro tavení materiálů, jež mají tavicí teplotu vyšší než 2000°C, například skel, oxidů, apod. Protože nedochází ke ztrátám vířivými proudy v jednotlivých segmentech kelímku jako u lamelového provedení, je u této konstrukce studeného kelímku vyšší účinnost. Hlavní nevýhodou je dotyk tavené vsázky a induktoru, což s sebou nese požadavky na účinné chlazení celého induktoru.[16],[17]



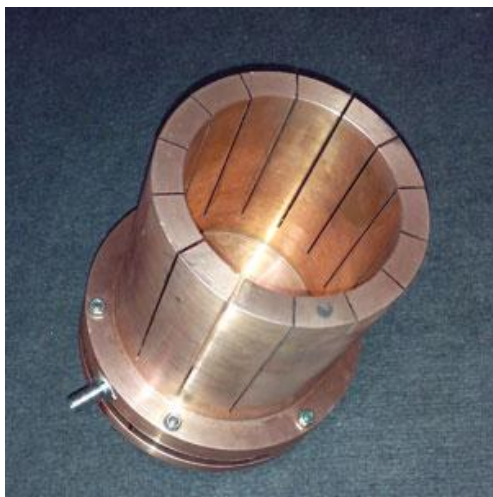
Obr. 2.2.1: Induktorový kelímek, tavení skla. [18]



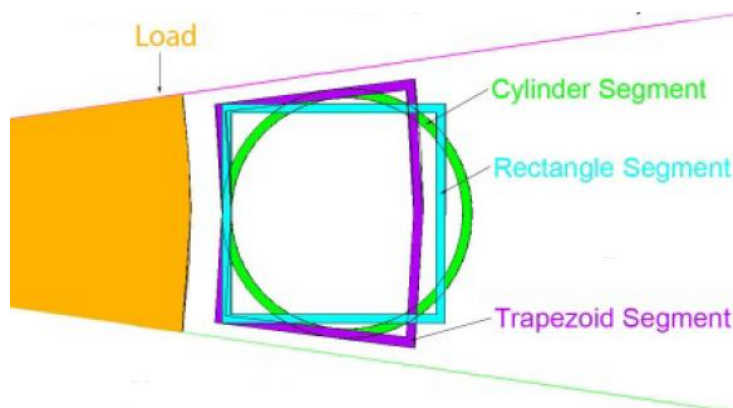
Obr. 2.2.2: Induktorový kelímek. [17]

b) Lamelový (segmentový) kelímek

V praxi se nejčastěji používá segmentový studený kelímek (Obr. 2.2.3). V této konstrukci jsou induktor a kelímek dva samostatné objekty. Kelímek musí být proveden tak, aby se do vsázky mohla dostat energie z induktoru – tzn. buď použitím nevodivého kelímku, nebo použitím kovového na segmenty členěného kelímku, nejčastěji z mědi, nebo nemagnetické nerezové oceli, případně hliníku. Mezera mezi jednotlivými lamelami nebývá zpravidla menší než 1 milimetr. Počet lamel kelímku bývá nejčastěji 6 a více – podle potřebného průměru tavicího kelímku. Obecně platí, že vyšší počet segmentů zajistí lepší rozložení elektromagnetického pole do vsázky.[16],[19],[20]



Obr. 2.2.3: Segmentový kelímek. [21]

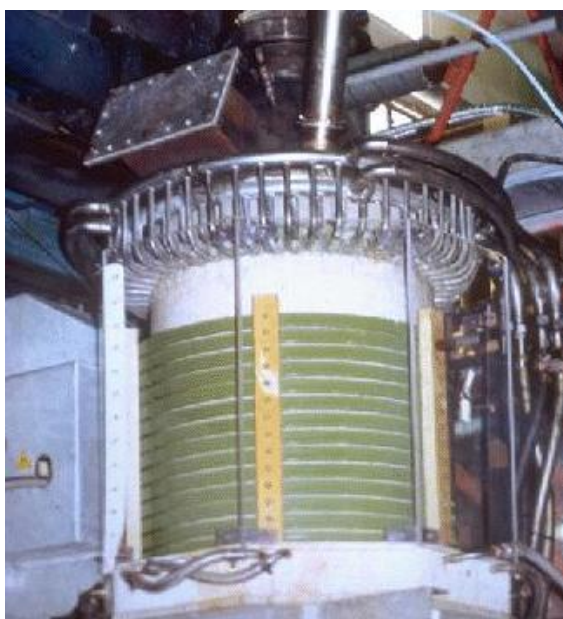


Obr. 2.2.4: Různé provedení tvarů jednotlivých segmentů kelímku. [20]

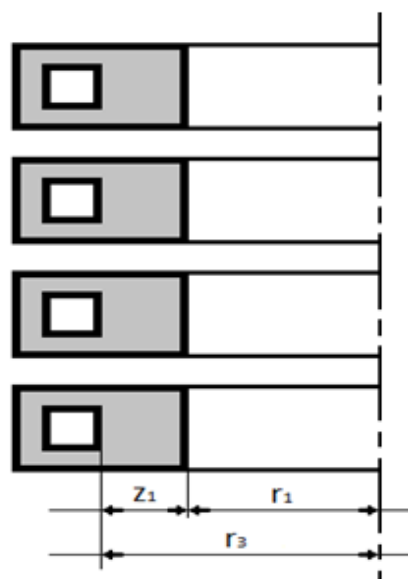
Mezi nejčastěji používané tvary průřezů segmentů patří kruhový, obdélníkový a lichoběžníkový průřez (viz. Obr. 2.2.4). V závislosti na použitém tvaru se mění i velikost Joulových ztrát přímo v segmentu. Pro kruhový průřez platí, že Joulovy ztráty uvnitř segmentu činí přibližně o 8-9% méně, než při použití obdélníkového nebo lichoběžníkového průřezu segmentu. [20]

2.3 Induktor

Induktor připojený ke zdroji proudu vytváří elektromagnetické pole o určité frekvenci. Magnetické pole projde studeným kelímkem do vsázky, a ohřívá ji. Pro menší výkony se



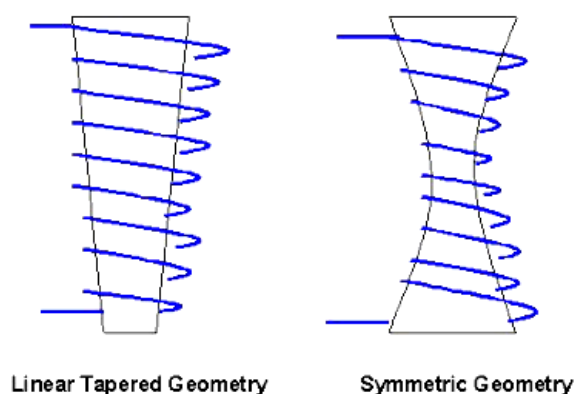
Obr. 2.3.1: Reálné provedení induktoru.[22]



Obr.2.3.2: Řez obdélníkovým Induktorem.[23]

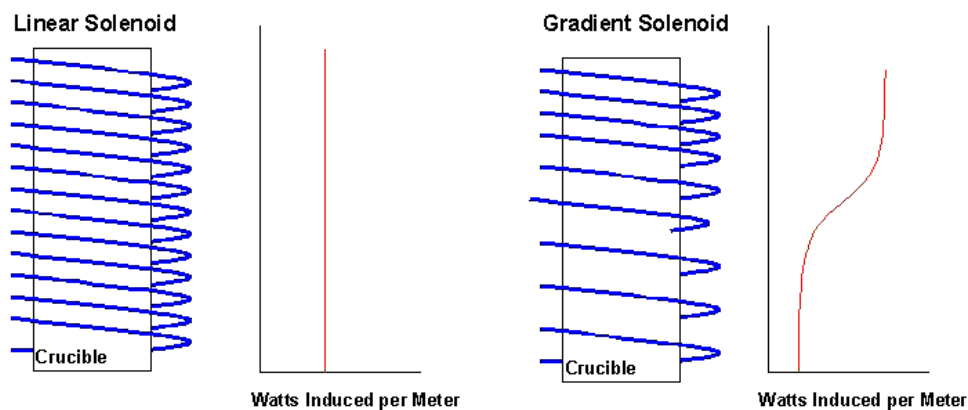
používá kulatý dutý induktor, pro větší výkony pak induktor obdélníkového průřezu. Průměr, počet závitů a vzdálenost mezi závitů induktoru se musí navrhovat tak, aby byla co nejvyšší účinnost celého zařízení. Protože uvnitř induktoru se nachází chladicí médium, je třeba, aby byla cívka dostatečně mechanicky zjištěna.

Existuje několik základních typů tvaru celého induktoru. Jedná se o lineární, zúžené, a symetrické provedení. Přestože vzdálenost cívky od kelímku je konstantní vždy, je možné měnit průměr kelímku, resp. induktoru. Toho se využívá v případě zúženého nebo symetrického provedení – zde platí, že změnou geometrie induktoru vzniká nehomogenní elektromagnetické pole. To má vliv na víření roztavené vsázky, rozvržení tepla ve vsázce, dobu tavení, a ztráty energie.[24]



Obr. 2.3.3: Lineární a symetrické provedení.

Naopak, lineární provedení má rozložení elektromagnetického pole rovnoměrné, a indukovaná energie do vsázky je po celé délce induktoru konstantní. U lineárního provedení cívky je možné provést tzv. gradientní zhuštění závitů. V tom případě nebude rozložení energie ve vsázce rovnoměrné. [24]

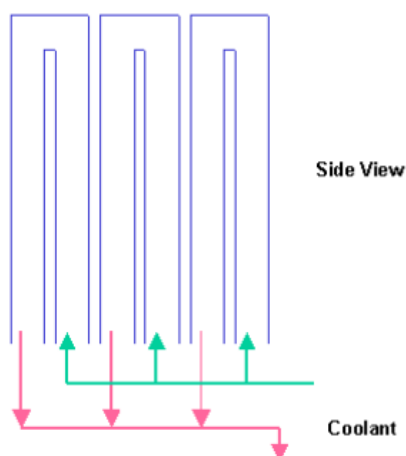


Obr. 2.3.4: Rozdíl v elektromagnetickém poli při různém tvaru cívky.

Jednotlivá provedení lze samozřejmě kombinovat, v závislosti na požadovaném rozložení elektromagnetického pole a tepla do vsázky, doby jejího tavení, apod. Avšak některá složitější provedení mohou být neúměrně obtížně vyrobitelná, ale i simulovatelná.[24]

2.4 Chladicí systém

Hlavní funkcí chladicího systému je intenzivně chladit studený kelímek, včetně induktoru, pokud se jedná o segmentové provedení kelímku. Jako chladicí médium je použita vysoce čistá, deionizovaná a demineralizovaná voda, aby nedocházelo k oxidaci nebo zanášení vnitřních chladicích kanálků. Chladicí médium poté proudí do vzduchového chladiče, kde dojde k ochlazení média, a následně putuje zpět do studeného kelímku. Celý systém chlazení musí být navržen tak, aby při výpadku elektrického napájení zařízení nedošlo k poškození kelímku v důsledku přehřátí, a aby nedocházelo k únikům chladicí vody do tavené vsázky.[24]



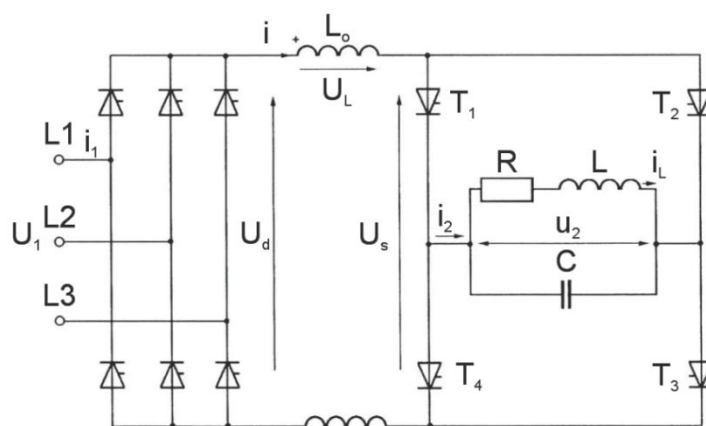
Obr. 2.4.1: Schéma chlazení segmentového studeného kelímku, pohled z boku. [24]

2.5 Elektrické napájení

Celá elektrická soustava napájení studeného kelímku sestává z měniče kmitočtu a vysokofrekvenčního indukčního generátoru. Hlavní požadavky na indukční vf generátor jsou dostatečný výkon a frekvence, resp. oblast frekvenčního rozsahu. Běžně se v průmyslovém využití používají výkony od desítek kilowatt až po stovky kilowatt, při frekvencích do 50MHz. Jádrem generátoru mohou tvořit například polovodičové součástky (tyristory, tranzistory typu IGBT, MOSFET), nebo také vakuové výkonové elektronky. Protože generátor pracuje s poměrně velkými výkony, je nutné aby byl dostatečně chlazen.[24]

a) Tyristorový měnič kmitočtu

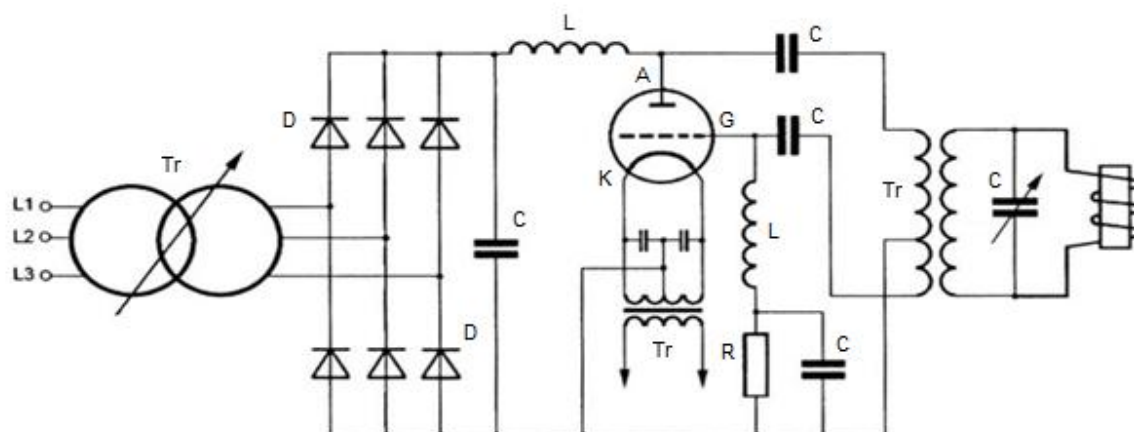
Tyristorový měnič kmitočtu sestává ze vstupního řízeného usměrňovače, vyhlazovací tlumivky, střídače proudu, startovacího obvodu a přepět'ových ochran. Vyhlazovací tlumivka, zpravidla o hodnotě několika jednotek mH, má za úkol vyhlazovat usměrněný proud z usměrňovače, a při zkratu uvnitř měniče omezit rychlý nárůst proudu, tak aby stačily zareagovat nadproudové ochrany. Mezi požadované vlastnosti tyristorů v měniči patří co nejkratší vypínací doba tyristoru (jednotky, maximálně desítky ms), vysoké blokovací a závěrné napětí, vysoký proud v propustném režimu (stovek kiloampér). Měnič se napájí ze sítě 50 Hz přes přizpůsobovací transformátor, který není součástí měniče. Řízení chodu měniče a ochranu elektronických dílů při poruchových stavech zajišťuje řídicí systém složený z regulátoru, převodníků a volně programovatelného automatu. Pro chlazení elektronických a dalších prvků silových obvodů je použit uzavřený vodní chladicí systém. Mezi hlavní výhody tyristorového měniče kmitočtu patří výborná účinnost bez ohledu na použitý výkon (resp. příkon) – více než 90%, dále dobrá spolehlivost celého zařízení, a mimo jiné i dobrá odolnost proti elektromagnetickému rušení. Nevýhodou je ale nižší frekvenční rozsah, zhruba jen do 20kHz. V dřívější době se pro tyto frekvence používaly rotační měniče, avšak tyristorové frekvenční měniče je v řadě parametrů předčí – tyristorové měniče mají lepší účinnost, snadnější vypínání, lepší spolehlivost, i menší celkové finanční náklady.[25],[9],[1]



Obr. 2.5.1: Schéma zapojení tyristorového měniče kmitočtu.[1]

b) Vysokofrekvenční elektronkový generátor

Vysokofrekvenční elektronkový generátor se napájí ze sítě 50Hz přes regulační vstupní transformátor. Celé zapojení je tvořeno usměrňovačem, vyhlazovacím kondenzátorem a tlumivkou, triodou, jejím žhavicím transformátorem a vysokofrekvenčním transformátorem.

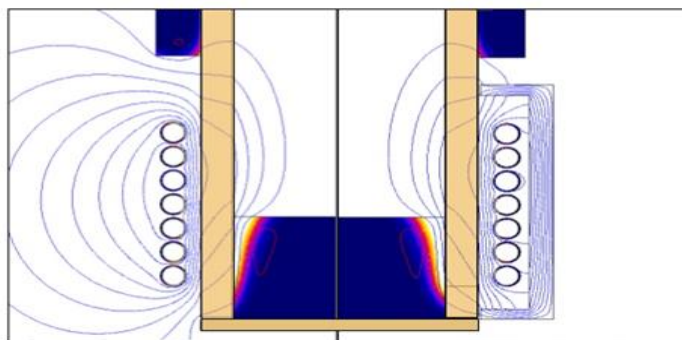


Obr. 2.5.2: Schéma zapojení VF elektronového generátoru.[1]

Indukčnosti a vzájemné indukčnosti v obvodu tvoří spolu s proměnným kondenzátorem na výstupu oscilační obvod, který pracuje na požadované frekvenci. Vysokofrekvenční elektronkový generátor se obecně využívá pro indukční ohřevy, kde jsou potřeba kmitočty vyšší než 20kHz. Účinnost tohoto generátoru se pohybuje v rozmezí 60-80%, v závislosti na typu použité elektronky, a průměrná životnost v provozu je řádově desetitisíce hodin.[1],[26], [27]

2.6 Elektromagnetické stínění studeného kelímku

Elektromagnetické stínění studeného kelímku má za úkol snížit nežádoucí vyzařování elektromagnetického vlnění vně mimo samotný kelímek. V praxi se běžně používá stínění buď kovovým krytem na principu Faradayovy klece, nebo pomocí transformátorových plechů, nebo užitím dostatečné ochranné vzdálenosti zařízení od ostatních objektů či osob.[24]



Obr. 2.6.1: Vliv stínění induktoru studeného kelímku (vpravo) proti induktoru bez stínění (vlevo).[27]

2.7 Off-gas systém

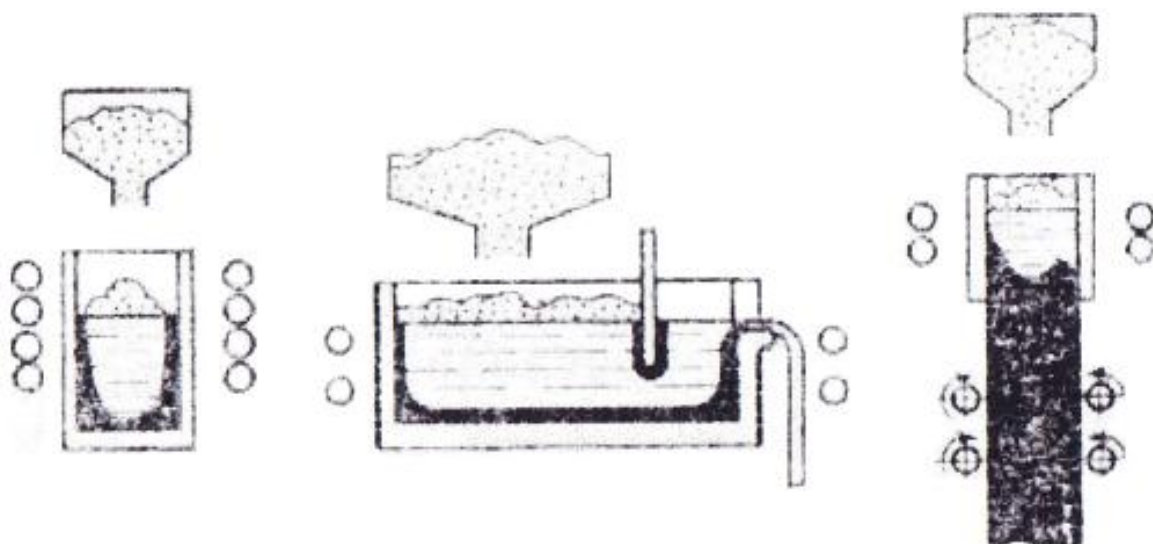
Off-gas systém pomáhá ve studeném kelímku odsávat nežádoucí plyny, které vznikají v průběhu tavení. Tyto plyny jsou složeny hlavně z vodní páry, oxidů (dusíku, síry, uhlíku, apod.), a stopovými zbytky radioaktivních prvků nebo těžkých kovů. Tyto plyny dosahují teplot až 200°C. Zároveň také Off-gas obstarává atmosféru pro tavení – vakuum, inertní plyny, nebo třeba jen požadovanou hodnotu tlaku vzduchu.[28]

2.8 Zpracování taveniny, feed systém

a) Rozdělení způsobů tavení z pohledu kelímku

Ve studeném kelímku existuje několik způsobů tavení vsázky, v závislosti na konstrukčním provedení kelímku, výrobních možnostech, a požadovaných koncových vlastnostech vsázky.[17]

První z možností je jednorázové tavení vsázky v kelímku – po konci tavení a vychladnutí zůstává tavenina uvnitř kelímku. Další možností je tavení s postupným uvolňováním přetavené hmoty. Postupné uvolňování taveniny se využívá například pro většinu skel, basalt, apod. Třetí možnost je využít tzv. průběžného tavení ve studeném kelímku, kdy je cílem tavení získat monolitický ingot taveného materiálu.[17]



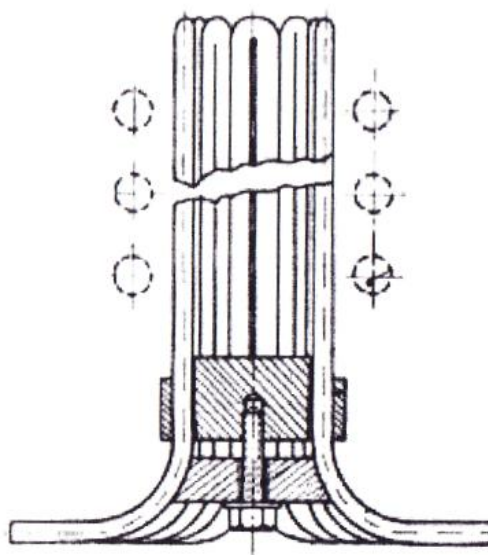
Obr. 2.8.1: Různé postupy tavení (řazeno zleva): Jednorázové tavení vsázky, tavení s postupným uvolňováním, a průběžné tavení.[17]

b) Rozdělení způsobů tavení z pohledu vsázky

1) Jednorázové tavení na ingot

Tavení na ingot probíhá v uzavřeném kelímku, který je naplněn požadovanou látkou, a látkou která umožní tavení, pokud se jedná o elektricky špatně vodivý materiál vsázky. Startovací množství tavené látky musí být mnohem menší, než je celková kapacita studeného kelímku. Po ohřátí tohoto množství substance lze naplnit kelímek požadovaným množstvím tavené látky. Tavení probíhá, dokud vsázka uvnitř kelímku není homogenní. Konec tavení může probíhat tak, že se najednou odpojí generátor, nebo naopak postupným snižováním jeho výkonu. To má vliv na výslednou krystalizaci ingotu. Po konečném vychladnutí lze samotný ingot z kelímku vyjmout.[17]

Největší výhodou tohoto způsobu tavení je jeho praktická jednoduchost, realizace celého zařízení, a možnost řízení. Ovšem hlavní nevýhodou tvoří nízká produktivita, protože se jedná o jednorázovou výrobu ingotu; dále také poměrně vysoké náklady na tavení, a v případě použití kelímků menších průměrů vyvstává také problém s přehříváním vsázky. Tento způsob se tedy využívá hlavně na jednorázovou výrobu velkých ingotů materiálu.[17]



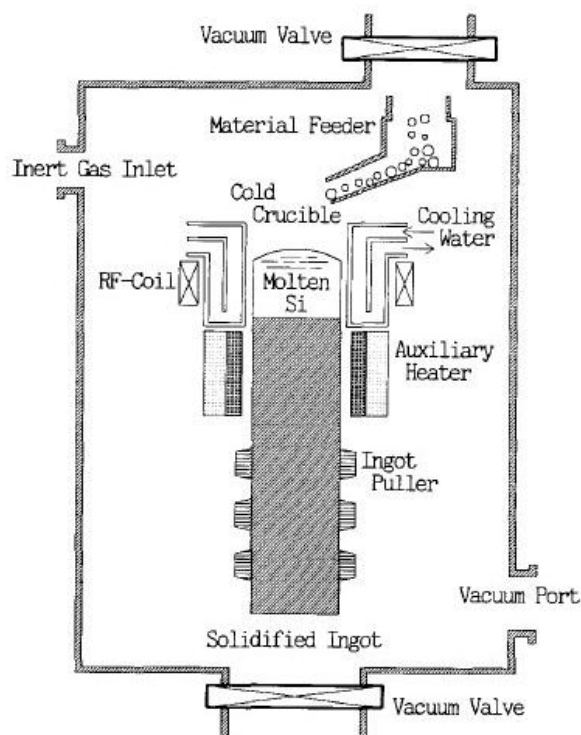
Obr. 2.8.2: Tavení na ingot, v rozmontovatelném kelímku.[29],[17]

2) Průběžné tavení na ingot

V porovnání s jednorázovým tavením má průběžné tavení na ingot velkou výhodu hlavně v ekonomičnosti celého procesu tavení. Dále je výhodou, že vzniklé ingoty materiálů jsou poměrně křehké, lze je tedy snadno lámat nebo rozřezat na požadovanou velikost krystalů. Jednoduchost konečného zpracování pak zlepšuje ekonomičnost tohoto způsobu tavení.[17]

Pro tento postup je potřeba přehřát taveninu ve studeném kelímku, přičemž krystalizace probíhá mimo studený kelímek. V současné době existují tři varianty lití taveniny ze studeného kelímku - spodní lití, náklonem kelímku, kontinuální odlévání taveniny z konstantní úrovně hladiny.[17]

Důležitým parametrem pro tento způsob tavení je rychlost odebrání ingotu z kelímku. V závislosti na způsobu odebrání, velikosti, a technickém provedení lze dosáhnout rychlostí až v desítkách milimetrů odebraného ingotu za minutu.[30]



Obr.2.8.3: Průběžné tavení, příklad tavení křemíku.[31]

3. Tavení elektricky vodivých materiálů

V dnešní době je v celé řadě technických oborů stále větší poptávka po čistých a vysoce čistých kovech nebo slitinách kovů. Technologie studeného kelímku umožňuje tavit kovy o výsledné čistotě až 6N van Arkelovy stupnice (99,9999% čistoty látky). Pro hodnoty více jak 3N se využívá technologie tavení UHV (Ultrahigh Vacuum). UHV umožní pro menší studené kelímky (zhruba do 10kg hmotnosti vsázky) udržovat tlak až 10^{-11} Pa před započítím tavení, a 10^{-4} až 10^{-6} Pa během tavení samotného. Ačkoliv se studený kelímek používá spíše pro tavení běžně elektricky nevodivých materiálů, i pro tavení vodivých materiálů nachází uplatnění (byť při mnohem nižší účinnosti celého procesu, do 20%), zejména pro titan, nikl, niob, molybden, kobalt, dále slitin na bázi titanu, hliníku, atd. Hlavním problémem při tavení některých slitin (jmenovitě slitiny titanu, zirkonu) je, že tekutá tavenina způsobuje erozi stěn kelímku, což má za následek jak nevratné poškození kelímku, tak i ovlivnění složení taveniny. V případě tavení jinými způsoby než je studený kelímek (např. VAR), musí být použita tavící nádoba ze speciální keramiky. VAR (Vacuum arc remelting) je způsob tavení materiálu elektrickým obloukem. Pro studený kelímek platí, že přímému kontaktu tekuté taveniny se stěnou kelímku brání vrstva skull, což problém eliminuje. Je snaha plochu kontaktu taveniny a studeného kelímku co možná nejvíce minimalizovat pomocí vzedmutí taveniny (tzv. semilevitační tavení).[32],[33],[34]

3.1 Tavení titanu a jeho slitin

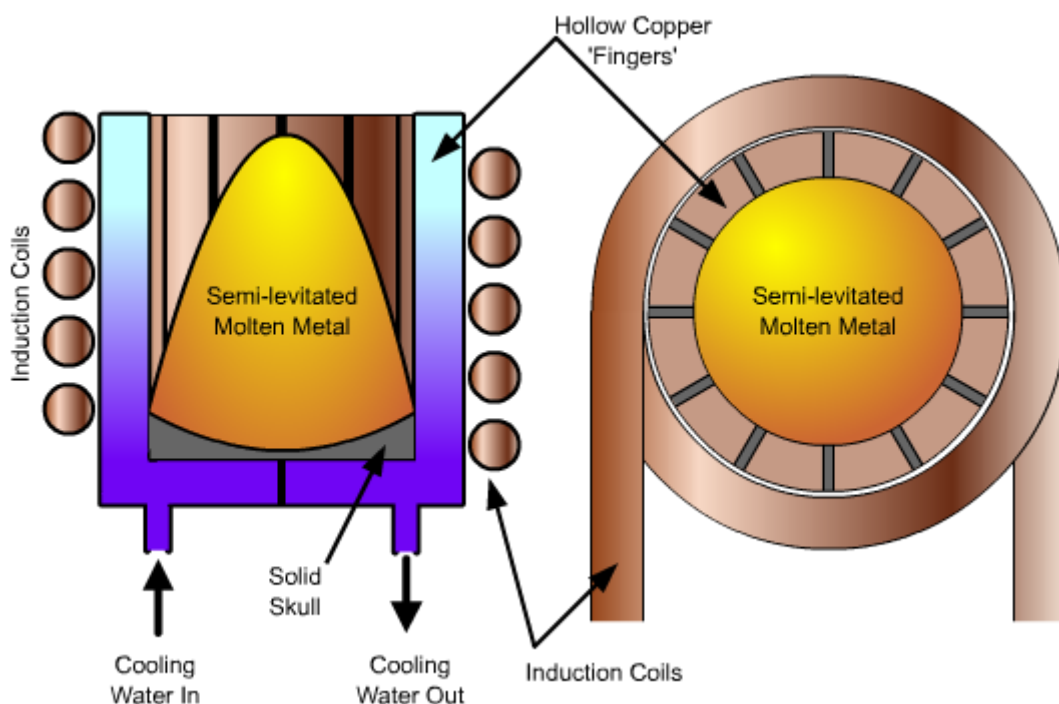
Mezi hlavní výhody titanu v porovnání s ostatními běžně průmyslově využívanými kovy patří odolnost vůči agresivnímu okolnímu prostředí, dobrá pevnost i tvrdost, a výborná chemická stálost. Titan si na svém povrchu vytváří stabilní vrstvy oxidů, které zabraňují korozi ve většině kyselin, solí nebo plynů. Avšak většímu rozšíření slitin na bázi titanu brání jejich cena. Náklady na výrobek vyrobený z titanu mnohonásobně převyšují náklady na výrobek totožný, ale nerezový, případně ocelový. To je způsobeno několika faktory.

Prvním, a z hlediska tavení nejsložitějším problémem je, že titan během tavení reaguje s kyslíkem a dusíkem. Musí se tedy tavit a zpracovávat buď ve vakuu (technologie UHV, viz kapitola 3.1), anebo v atmosféře inertního plynu, kupříkladu argonu. Síla odlitků je ovlivněna obsahem kyslíku ve vsázce titanu. Do určitých procentuelních hodnot kyslíku dochází k posílení pevnosti titanového odlitku, proto se obsah kysličníků musí pečlivě hlídat. Lze pro konkrétní požadavky smíchat směs titanu s vysokým obsahem kyslíku se směsí, jež obsahuje

kyslíku méně. Dále je také možné v případě nutnosti přidávat do vsázky oxid titaničitý. Druhým problémem je odlévání taveniny titanu do forem. Tyto formy nesmí nijak reagovat s žhavou vsázkou, často jsou využity materiály na bázi oxidů zirkonu. To však dramaticky zhoršuje ekonomickou výhodnost celého procesu. Dále je problémem recyklace – nejen šrotu, ale také nepovedených odlitků.[35]

Studený kelímek pomocí ISM (Induction skull melting) odstraňuje většinu těchto problémů. Oproti VAR je zde výhoda rychlejších cyklů tavení, nulová kontaminace taveniny stěnou kelímku, a především hlavně možnost recyklace titanového šrotu. To samozřejmě zlepšuje ekonomickou výhodnost celého procesu tavení titanu při zachování vysoké čistoty a kvality taveniny. Obecně mezi hlavní výhody ISM patří:

- Možnost tavení širokého spektra kovů a slitin
- Reálná hmotnost taveniny v kelímku může dosahovat až 100 kg
- Dobrá trvanlivost studeného kelímku – lze dosáhnout až desítek tisíc tavících cyklů
- Výborná homogenita zpracovaného materiálu vlivem magnetického pole, které způsobuje víření roztavené vsázky



Obr. 3.1.1: Tavení kovů metodou ISM.[36]

I při použití studeného kelímku pro tavení titanu je však nutno počítat s odléváním do formy. Pro většinu slitin se používají formy na bázi oxidů zirkonu, křemíku, apod. To však pro

odlévání titanu a jeho slitin není možné, protože by došlo ke zvýšení poréznosti hotového odlitku. Musí být použity takové materiály formy, aby nedocházelo k reakci titanové taveniny a oxidů formy. Proto tato forma je vyráběna z vysoce odolných a stálých materiálů, např. thoria, yttria, nebo zirkonia. Dalším problémem při odlévání titanu je poměrně vysoká viskozita. Tekutost roztaveného titanu je vcelku špatná, a vede k nepřesnému odlévání (zejména u malých odlitků), smršťování, nebo k vnitřním vadám odlitku. Z tohoto důvodu se titan odlévá především odstředivým litím.[35]

Tab. 3.1.1: Chemické složení „čistého titanu“ a titanové slitiny Ti-6Al-4V

Chemické složení titanu a slitiny Ti-6Al-4V po tavení [v %]		
	Titan	Ti-6Al-4V
Uhlík	0,10	0,10
Vodík	0,01	0,01
Dusík	0,05	0,05
Kyslík	0,35	0,25
Železo	0,30	0,40
Vanad	0	3,5 - 4,5
Hliník	0	5,5 - 6,75
Ostatní prvky	0,40	0,40

Tabulka ukazuje chemické složení titanu a jeho slitiny Ti-6Al-4V. Pro mnoho kovů platí, že odlévaný výrobek má zpravidla horší vlastnosti než tentýž výrobek zpracovaný tvářením. Avšak odlitky z titanu jsou srovnatelné s tvářenými výrobky, v některých případech jsou dokonce i lepší – například odolnost proti šíření vnitřních trhlin je mnohem lepší u odlitku.

Tavení metodou ISM umožňuje přidávat materiál do kelímku během tavení, což je využíváno pro tavení různých slitin. Lze tak snadno dosáhnout maximální hmotnosti tavené vsázky v kelímku, lze lépe kontrolovat dávkování legur do taveniny, a také je možné udržovat vsázku roztavenou po dlouhou dobu. To pomáhá hlavně pro správné roztavení a zamíchání obtížně tavitelných legujících přísad, jako např. tantal, wolfram, jsou-li použity. Po ukončení tavicího procesu zůstává na dně studeného kelímku tenká krusta (skull). Tuto krustu lze snadno odebrat a urychlit tak přípravu kelímku pro další vsázky, i například jiné slitiny. Například tavení čistého titanu (čistý titan je spíše obchodní termín, viz tab 3.2.1) může následovat tavení slitiny Ti-6Al-4V, a dále například tavení skla na bázi oxidů zirkonu bez toho, aby došlo ke kontaminaci jedné nebo druhé vsázky a s jen minimálními prostoji ve výrobě. Ve srovnání s ostatními způsoby tavení tak vychází ISM ve studeném kelímku jako nejlepší možný způsob.[35]

Tab. 3.1.2: Příklad slitin vyráběných metodou ISM:

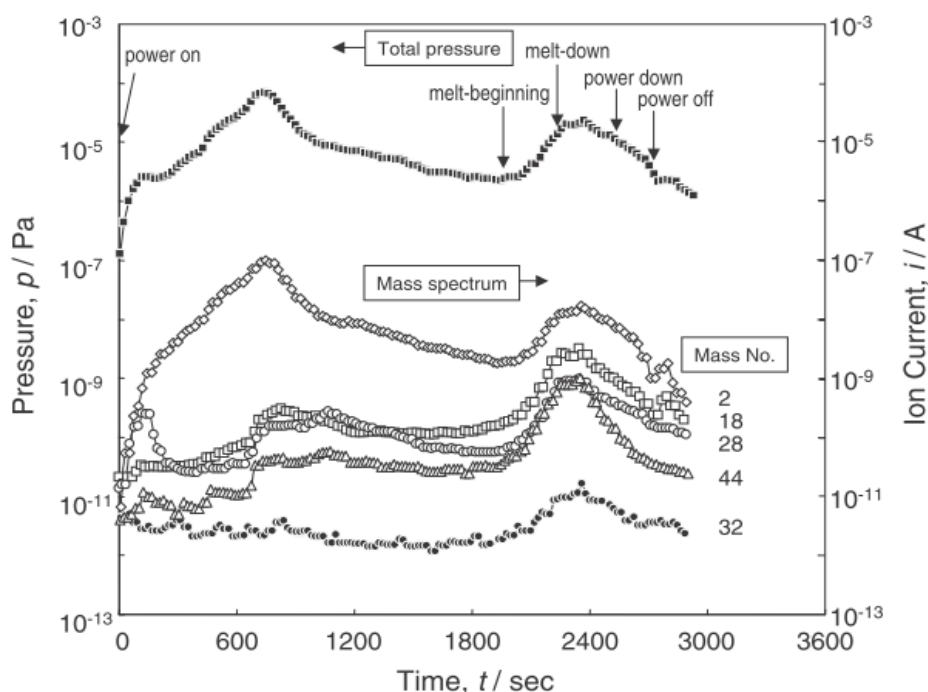
Často používané slitiny podle základních prvků				
Titan	Ti-Al	Nikl	Zirkon	Ostatní
Ti	TiAl- γ	Ni	Zr	Cu
Ti-12Pd	Ti ₃ Al- α -2	NiAl	Zr-2SNb	Co
Ti-6Al-4V	Ti-Al-Nb	NiCu	Zircalloy 2	Sb
Ti-6-2-4-2			Zircalloy 4	Al

3.2 Čištění titanu od nežádoucích příměsí

Pro vyčištění ingotu titanu od nežádoucích příměsí je potřeba použít studeného kelímku, který umožní tavit v kontrolované atmosféře (UHV). Celý proces funguje na principu odpařování příměsí, které mají nižší bod tání a varu než titan. Následující tabulka a graf ukazují změnu příměsí při čištění titanového ingotu pomocí studeného kelímku s UHV. Výhodou je, že vysoce čistý titan lze tavit ve studeném kelímku bez jakékoliv kontaminace kyslíkem.

Tab. 3.2.1: Změna složení titanového ingotu (hodnoty jsou v ppm):

Prvky [ppm]	Al	Be	Ca	Cr	Cu	Fe	Na	S	Si	Zr
Ti (5N)	0,16	0,01	0,02	0,15	0,62	0,08	0,06	0,66	0,04	0,75
Ti (po čištění)	0,07	0,01	0,02	0,23	0,74	0,03	0,01	0,50	0,10	0,61



Obr.3.2.1: Graf ukazující závislost změny tlaku plyných nečistot při tavení ingotu titanu (5N), sloučeniny označené v grafu čísly 2,18,28,32,44 jsou H_2 , H_2O , CO , O_2 , CO_2 . [32]

4. Tavení běžně elektricky nevodivých materiálů

4.1. Zahájení tavení, přehřívací proces vsázky

Studený kelímek nachází využití i pro tavení širokého spektra elektricky nevodivých nebo jen minimálně vodivých látek. Zejména speciálních oxidů, skel, keramik, izolačních materiálů. Aby mohly být nevodivé materiály vůbec tímto způsobem taveny, musí nějakým způsobem dojít k přehřátí vsázky. Tento proces se označuje „set-up“ nebo také „start-up“. Existuje několik způsobů, jak provést tuto startovací fázi tavení:

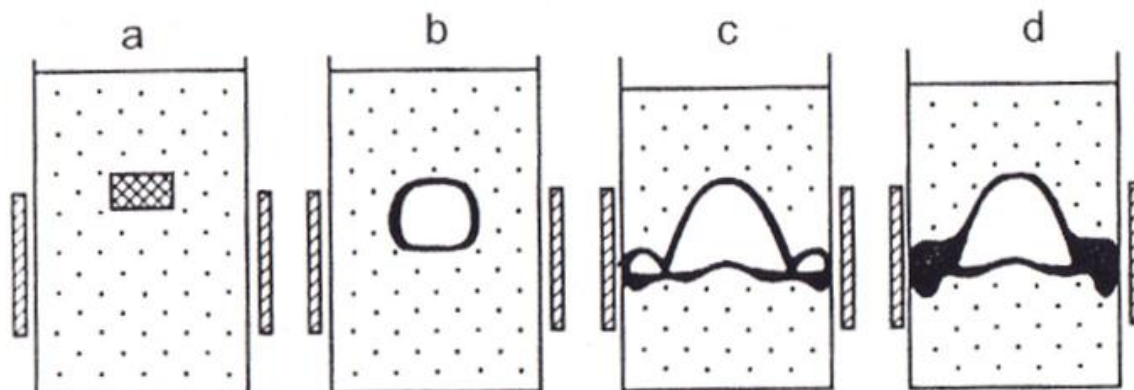
- Ohřev přímo pomocí elektrického oblouku
- Ohřev vsázky přímo plynovým hořákem
- Pomocí přenosu tepla z kusu elektricky vodivého materiálu, který se umístí do kelímku spolu se vsázkou
- Ohřev vsázky využitím energie exotermické oxidace kovu, jehož oxid podléhá tavení
- Ohřev vsázky plazmou

Využití energie z exotermické oxidace kovu, jehož oxid je zároveň taven ve studeném kelímku je nejčastěji používanou metodou přehřátí vsázky. Tento způsob funguje na principu indukčního ohřevu kovových částic (drti, hoblin) v objemu nevodivé vsázky. Tento kovový základ způsobí, že pomocí vedení a sálání předá část tepla elektricky nevodivé vsázce, která má se zvyšující se teplotou vyšší elektrickou vodivost. Kupříkladu, pro tavení běžně využívaných oxidů jako např. Al_2O_3 , Y_2O_3 , ZrO_2 , je použit pro zahájení tavení kov Al, Y, Zr. Hlavní výhodou tohoto způsobu je jednoduchost a nulové riziko kontaminace nežádoucími prvky.

Další, často používaný způsob přehřátí je umístění kusu elektricky vodivého materiálu ve tvaru prstence do studeného kelímku spolu se vsázkou. Jako vodivý materiál se používá buď uhlík, karbid křemíku, molybden, případně i žíhaná ocel. Tento prsteneček se chová jako závit nakrátko, ohřívá se, a tepelným přenosem ohřívá i elektricky nevodivou vsázku. Tohoto způsobu přehřátí vsázky je ale možné využít pouze pro oxidy s nižší teplotou tání vzhledem ke startovací vodivé kovové části vsázky a také pokud není vyžadována velká výsledná čistota ingotu (např. pro vitifikaci radioaktivních odpadů).

Pro ohřev vsázky je také možno použít plynových hořáků. S tímto způsobem přehřívání vsázky jsou však spojeny dva problémy. Prvním je ovlivnění vsázky spaliny plynů. To

může být zásadní problém, pokud je zapotřebí dosáhnout vysoké čistoty výsledného ingotu. Dalším, spíše funkčním problémem, je odfoukávání drcené vsázky plamenem hořáku. Proto je tento způsob využíván jen v malém rozsahu, např. pro vsázku, která je z jednoho kusu nebo velmi hrubé drti.[17]



Obr. 4.1.1: Znázornění přehřátí vsázky pomocí indukčního ohřevu nebo exotermické oxidace. Vložení vodivého materiálu do vsázky (a), natavení (b) a postupné zvětšování roztaveného objemu vsázky (c,d).[17]

4.2 Chlazení přetavené vsázky oxidů a skel, růst krystalů

Výroba krystalů různých oxidů má dnes svoji nezastupitelnou roli v průmyslu. Krystaly se používají v optice, laserech, mikroelektronice, energetice, apod. Ke krystalizaci oxidů a skel dochází ve studeném kelímku při chladnutí přetavené vsázky. Celý proces chladnutí vsázky je klíčový pro zajištění požadované výsledné kvality a celkových vlastností ingotu. Krystalizace taveniny oxidů a skel lze dosáhnout pomocí:

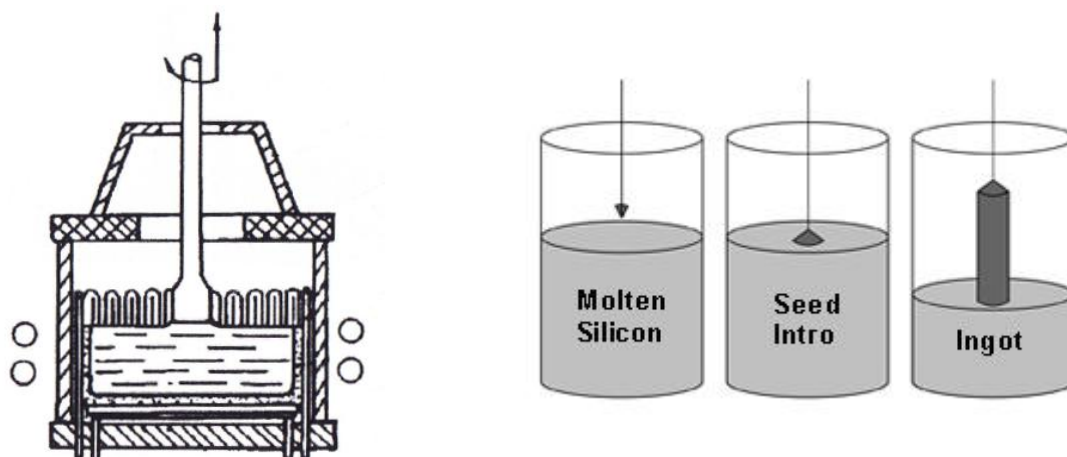
- Vypnutí napájení studeného kelímku, což vede k nárazové krystalizaci celého ingotu
- Litím vsázky do vody
- Prouděním vzduchu na povrch vsázky
- Řízenou krystalizací ovládním teplotního rozložení ve studeném kelímku

Po vypnutí generátoru napájení studeného kelímku zůstává teplota taveniny stále vysoká, a pro vychladnutí na teplotu 50 – 80°C je nutné, aby chladicí systém fungoval ještě několik dalších hodin. Při použití segmentového studeného kelímku je poté třeba odčerpat vodu z chladicího systému kelímku a rozebrat kelímek a induktor.

Velmi často používanou metodou krystalizace je Czochralského metoda růstu krystalů. Tato metoda umožňuje vytvářet syntetické monokrystaly různých prvků či sloučenin, např. křemíku, germania, apod. Princip spočívá ve vytahování taveniny ze studeného kelímku na rotující tyč. Průměr výsledného krystalu je ovlivněn teplotou vsázky a velikostí tažné rychlosti. Výhodou také je, že případné nečistoty obsažené v původní vsázce zůstávají během vytahování krystalu stále v tekuté tavenině v kelímku. Czochralského metoda je závislá na specifickém rozložení tepla v tavenině, je potřeba přetavit vsázku na potřebnou teplotu pro zahájení krystalizace. Tato metoda má několik úskalí:

- Obtížná regulace a udržování teploty uvnitř vsázky, ze které se vytahuje ingot
- Nesnadné vytvoření rovnoměrného rozložení teploty jak na povrchu taveniny, tak v jejím objemu

Na rozložení teploty v objemu vsázky má vliv několik faktorů: mechanické rozměry a tvar jak kelímku, tak i induktoru, dále zvolený rozsah pracovní frekvence napájecího generátoru, případně i dodatečné zdroje ohřevu.[17],[38]



Obr. 4.2.1: Levý obrázek – řez studeným kelímkem[17], pravý obrázek – postup Czochralského metody.[37]

Další možností je metoda přímé krystalizace. Tato metoda vyniká především jednoduchostí a možností vytvářet krystaly velkých rozměrů. Nejsnazší způsob, jak zahájit krystalizaci, je posunout studený kelímek vzhledem k induktoru. Během posunu kelímku od induktoru se mění elektromagnetické pole působící na taveninu. Díky tomu vzniká v části vsázky, na kterou již nepůsobí induktor, krystalizační proces. Další možností jak také docílit přímé

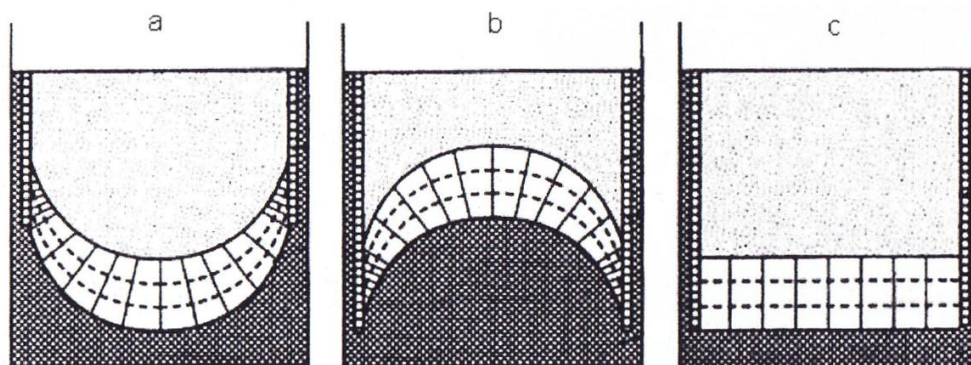
krystalizace je využití jednoho ze způsobů chlazení společně se zmenšováním výkonu napájecího generátoru.

Ve srovnání s jinými metodami krystalizace vyniká metoda přímé krystalizace především:

- Proces růstu krystalu není závislý na okolní atmosféře
- Snadné přidávání přísad pro legování
- Při velkém množství taveniny probíhá konvexní míchání vsázky, což snižuje střední hodnotu obsahu nečistot ve směru růstu krystalu

Rozměry výsledného monokrystalu získaného touto metodou jsou ovlivněny především celkovým objemem tavené vsázky, směrem krystalizace, rychlostí pohybu studeného kelímku oproti induktoru či řízením výkonu napájecího generátoru.

Tvar krystalizace je určen jak teplotou taveniny v momentu začátku krystalizace, tak elektrickou vodivostí tavené látky. V závislosti na těchto parametrech bude hladina vsázky nabývat vodorovného, konvexního, nebo konkávního tvaru.[17]



Obr. 4.2.2: Růst krystalu ve studeném kelímku – a) konkávní, b) konvexní, c) vodorovný směr růstu krystalu.[17]

Tab. 4.2.1: *Metody růstu krystalů v praxi pro různé sloučeniny: [17]*

Materiál vsázky	Teplota tavení sloučeniny [°C]	Metoda krystalizace
MgO ₂	2800	Přímá
Al ₂ O ₃	2046	Czochralského
TiO ₂	1855	Přímá
Fe ₃ O ₄	1560	Přímá
ThO ₂	3400	Přímá
UO ₂	2878	Přímá
Y ₂ O ₃	2400	Czochralského
ZrO ₂	2400	Přímá
B ₄ C	2500	Přímá
SrTiO ₃	1910	Czochralského

4.3 Vysokoteplotní syntéza oxidů

Důležitým prvkem pro výrobu většiny materiálů tavených při vysoké teplotě je chemická syntéza sloučenin, především oxidů a fluoridů. Pro získání ať už skel, keramik, nebo krystalů, je třeba provádět syntézu sloučenin ze základních látek. To se zpravidla provádí slinováním drcené vsázky při 60-80% teploty tavení. Při tavení sloučenin ve studeném kelímku není fáze slinování zapotřebí, syntéza sloučenin probíhá v tekuté tavenině při vyšších teplotách než je bod tání jednotlivých sloučenin. Studený kelímek tedy umožní celý proces výrazně zkrátit, při zachování dobré produktivity. Proces slučování oxidů ve studeném kelímku často bývá prováděn při běžné atmosféře, kyslík obsažený ve vzduchu tvoří tedy složku při reakci tavených oxidů. V závislosti na viskozitě taveniny a rozpustnosti plynných složek ve vsázce může docházet k následujícím jevům:

- Rychlé vyhoření jedné nebo více z tavených sloučenin. Dochází ke zhoršení výsledné kvality, snižuje se také elektrická vodivost vsázky.
- Velká absorpce kyslíku obsaženého ve vzduchu taveninou. To zhoršuje krystalizaci, výsledný ingot může být porézní, a tím znehodnocený.

Dále může docházet ke zvýšení obsahu mědi ve výsledném taveném produktu, zhruba o tisíce procent. To je způsobeno interakcí síry či chlóru obsažených v plynech, které vznikají při tavení, spolu s materiálem studeného kelímku. Tento problém lze odstranit využitím jiného kovu pro studený kelímek, například hliníku nebo nerezové oceli, avšak za cenu nepatrně vyšších energetických ztrát.[17]

Tab. 4.3.1: Příklad sloučenin tavených ve studeném kelímku, a jejich tavicí teploty:

Sloučenina	LiF	NaF	NaCl	KCl	Al ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	TiO ₂	TbO ₇	HfO ₂	V ₂ O ₅
Teplota tavení [°C]	842	995	800	770	2046	2400	1855	2330	2790	670

4.4 Výroba keramiky a tepelně izolačních materiálů

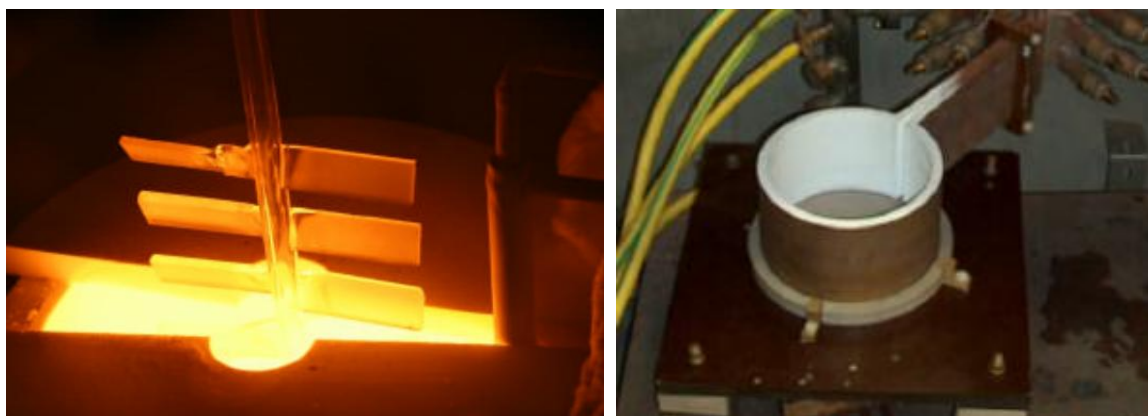
Technologie studeného kelímku je také využívána pro přetavení potřebného materiálu na krystaly. Tyto krystaly jsou následně rozdrčeny na jemnou drť, která je použita pro brusiva, izolační materiály, pro materiály na výrobu keramik a žárupevných materiálů. Keramika vyrobená z těchto materiálů se vyznačuje minimálním smršťováním a deformací při výrobě, a dobrými tepelně izolačními vlastnostmi.

4.5 Tavení skel ve studeném kelímku

Tavení vícesložkových skel je technologicky poměrně složitý proces. V plynových a elektrických pecích lze tavit skla přibližně do teplot okolo 1600°C a skla vyráběná v těchto zařízeních jsou navíc ovlivněna nečistotami.

Naopak ve studeném kelímku je možno tavit i chemicky agresivní skla a vlivem vrstvy skull v tavenině nedochází v takové míře ke kontaminaci skla. Výhodou také je možnost zpracovávání skel s vyšší teplotou tavení. Použití studeného kelímku pro tavení skel má tyto vlastnosti:[17]

- Taví se spíše jednoduché oxidy, složitější sloučeniny, např. kovové soli v plynné formě totiž reagují s materiálem kelímku
- Skla mají velkou viskozitu, je tedy potřeba zajistit míchání, aby byl výsledný produkt homogenní
- Je zapotřebí předehřátí vsázky před samotným tavením
- Aby nedocházelo k rychlé krystalizaci taveniny, a tedy nevratnému poškození ingotu, je potřeba zajistit adekvátní žíhání



Obr. 4.5.1: *Levý obrázek – zařízení pro míchání skla během tavení, vyrobeno ze žárupevného skla; Pravý obrázek – pro tavení skla se častěji využívá induktorového provedení studeného kelímku.[39]*

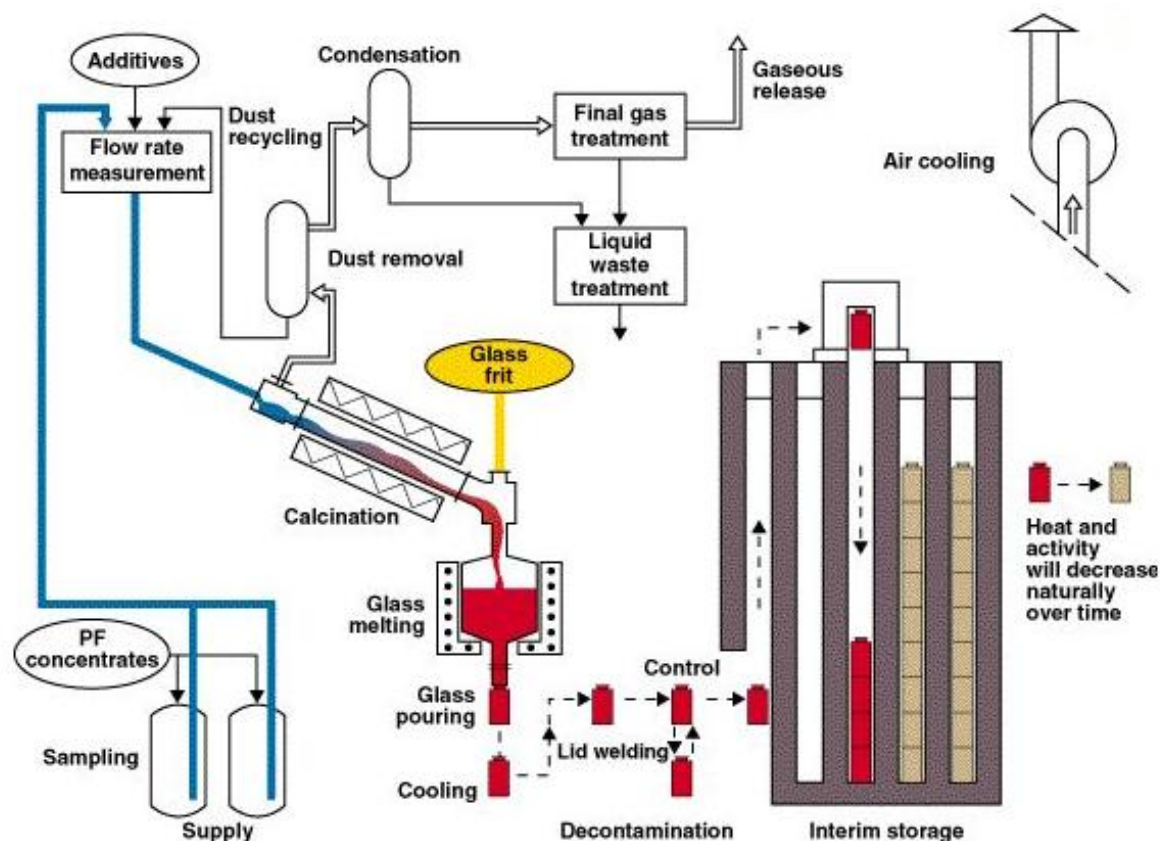
Tavení skla ve studeném kelímku má čtyři fáze. Nejprve musí dojít k předehřátí vsázky, aby získala potřebnou elektrickou vodivost. To se děje často plynovými hořáky, jako palivo je použita směs metanu a kyslíku. Po vypnutí hořáků je zapnut napájecí generátor, a vsázku taví elektromagnetické vlnění a tavenina je kapalná. Další, a nejdelší fáze, je homogenizace vsázky. Ta může trvat i několik hodin v závislosti na druhu skla, a vsázka je během tohoto procesu míchána a udržována při určité teplotě. V poslední fázi probíhá chlazení taveniny, lití a následné předzpracování.[39]

4.6 Vitřifikace odpadu pomocí studeného kelímku

Radioaktivní odpad z jaderných elektráren představuje velké nebezpečí pro životní prostředí, jak vysokou chemickou toxicitou, tak především silnou radioaktivitou. Jednou z metod vitřifikace (zpracování) radioaktivních odpadů je jejich zalití do skleněné či keramické matrice. Takto zpracovaný odpad tvoří přibližně 20-50% objemu celé matrice, v závislosti na úrovni radiace vitřifikovaného odpadu.[17]

Radioaktivní odpad se dělí podle úrovně radioaktivity do tří skupin. První skupinu, nízkoradioaktivní odpad (LLW), tvoří zhruba 90% objemu veškerého radioaktivního odpadu. Tyto odpady nejsou tak nebezpečné, lze je zpracovávat bez stínění či chlazení a ukládat do povrchových úložišť nebo spalovat.

Středně radioaktivní odpad (ILW) tvoří například materiály pro uskladnění palivových článků. Odpady této úrovně je třeba při zpracování i manipulaci stínit, a často se uskladňují pod zemský povrch.



Obr. 4.6.1: Proces vitrifikace radioaktivního odpadu ve studeném kelímku včetně kalcinátoru a offgas systému.[40]

Třetí skupinu, vysoce radioaktivní odpady (HLW), tvoří vyhořelé palivo z jaderných elektráren. Přestože HLW tvoří zhruba jednotky procent celého objemu všech radioaktivních odpadů, jedná se o nejnebezpečnější odpady, které musí být odstíněny a chlazeny. Při poločasů rozpadu v řádech stovek let jsou pro skladování HLW nezbytná hlubinná úložiště.[41]

Zpracování vysoce radioaktivního odpadu vitrifikací je v praxi osvědčený proces. Na vývoji této technologie se v posledních desetiletích podílela řada zemí, jmenovitě např. Francie, Rusko, Německo, USA, Indie, atd. Často jsou pro vitrifikaci HLW použita borosilikátová skla. Mezi hlavní výhody zalití odpadů do skla patří:

- Skla jsou odolná proti chemickým, teplotním, i radiačním vlivům
- Skla jsou při tavení dobrým rozpouštědlem pro radioaktivní odpad
- Skla lze vyrábět při relativně nízkých teplotách

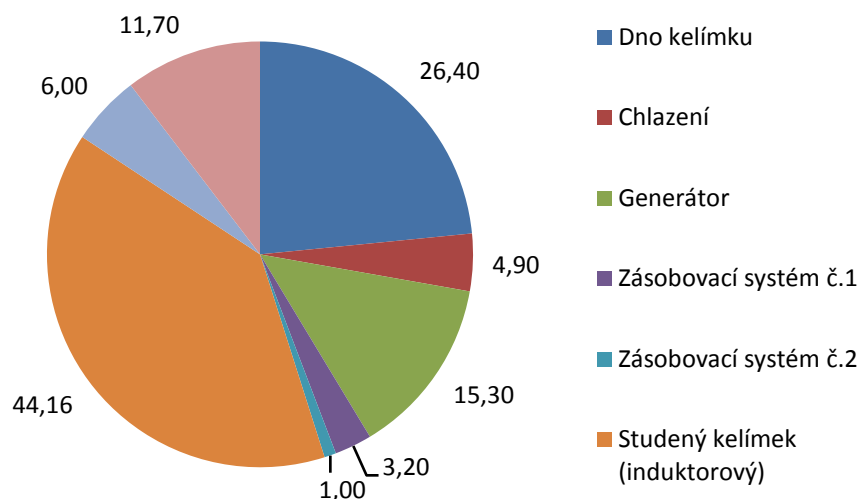
- Skla dobře snáší změny radioaktivních složek odpadu, s časem se jejich vlastnosti nemění

Během tohoto procesu je do studeného kelímku dodávána průběžně jak drť skla, tak i drť odpadu. Odpad musí být před přidáním do studeného kelímku vysušen v kalcinátoru. Mezi dva základní parametry kalcinátoru patří objem zpracovaného odpadu za hodinu, a maximální množství odsátých výparů při kalcinaci za hodinu. Tyto výpary jsou dále kondenzovány na kapalný odpad.

V současné době se zkoumá možnost využití vitrifikace pomocí studeného kelímku ve větším rozsahu, dále příprava skelné matrice a její chování v dlouhodobém měřítku.[17],[42],[43]

5. Hodnocení metody studeného kelímku

Účinnost studeného kelímku jako celého zařízení závisí především na typu vsázky. Pro tavení kovů se účinnost pohybuje do 20%, v případě tavení elektricky nevodivých materiálů jako skla nebo keramiky stoupá účinnost až zhruba k 70%. [17],[39]



Obr. 5.1.1 Rozložení ztrát v induktorovém studeném kelímku při tavení oxidů (hodnoty jsou v kW); Největší ztráty vznikají v samotném studeném kelímku. Maximální výkon studeného kelímku činí 320kW. [39]

Tab. 5.1.1: Produktivita studeného kelímku v praxi při tavení oxidů, jednorázové tavení: [17]

Tavený materiál	Plocha hladiny taveniny [cm ²]	Produktivita [kg/h]	Energie potřebná pro tavení 1 kg vsázky [kWh]
CaO	65	3,5	8,5
ZrO ₂	50	2,0	7,0
Sm ₂ O ₃	50	2,5	5,3
Dy ₂ O ₃	50	4,0	4,1
Y ₂ O ₃	50	3,1	7,6
Al ₂ O ₃	50	2,7	3,6

Tab. 5.1.2: Produktivita studeného kelímku v praxi při tavení oxidů, průběžné tavení: [17]

Tavený materiál	Plocha hladiny taveniny [cm ²]	Produktivita [kg/h]	Energie potřebná pro tavení 1 kg vsázky [kWh]
Y ₂ O ₃	95	25,0	2,3
Al ₂ O ₃	80	13,0	2,1
MgO	80	11,5	6,0
CeO ₂	80	9,0	4,5

Tab. 5.1.3: Srovnání studeného kelímku a VAR pece pro tavení slitiny Ti-6Al-4V:[35]

	VAR	Studený kelímek
Dnů v roce v provozu	230	230
Hodin v provozu za den	24	24
Průměrná doba pracovního cyklu [min]	7,75	6
Přibližný počet tavení za den	152,32	196,80
Max. hmotnost vsázky	15,3	7,5
Náklady na tavení [\$/kg]	15,00	8,25
Hmotnost elektrody	129	-
Výdrž elektrody (počet cyklů)	12	-
Hmotnost zpracované taveniny za rok [t]	446,7	423,2
Pořizovací náklady zařízení [€]	1 290 000	1 100 000
Celkové náklady na jeden tavící cyklus [€]	203,48	59,25
Celkové náklady na materiál za rok [€]	6 432 253	2 087 802

Tab. 5.1.4: Srovnání odporové pece a studeného kelímku pro vitifikaci odpadů:[44]

	Odporová pec	Studený kelímek
Kapacita tavení [kg/h]	až 25	až 25
Spotřeba energie na tavení vsázky [kWh/kg]	2,5 - 3,2	4,4 - 6,4
Pracovní teplota [°C]	až 1300	až 3000
Hmotnost zařízení včetně vsázky [kg]	přes 1000	do 200
Účinnost zařízení [%]	40 - 50	30 - 60

6. Závěr

Jak již bylo řečeno, mezi hlavní výhody studeného kelímku patří široké spektrum pracovních teplot při tavení vsázky, možnost tavit jak elektricky vodivé tak i nevodivé materiály. V blízké budoucnosti bude studený kelímek dále sloužit pro zkoumání nových, obtížně tavitelných kovových slitin, pro vytváření speciálních skel, keramik, sloučenin oxidů, karbidů, či fluoridů, atd. V neposlední řadě se také řeší využití studeného kelímku pro vitrifikaci a hlubinné uskladnění vysoce radioaktivních odpadů.[17]

Přestože je technologie tavení materiálů ve studeném kelímku známa již desítky let, stále probíhá výzkum ohledně tvarů a konstrukčních provedení jak kelímku, tak i induktoru. V poslední době se také provádějí rozsáhlé simulace a modelování působení elektromagnetického pole při celém procesu tavení, průběh krystalizace vsázky, apod. Hlavní výhodou simulací tavení materiálů ve studeném kelímku je ekonomická výhodnost, a snadná technická realizace. Není totiž zapotřebí vyrábět velké množství nákladných prototypů pro výzkum.[17],[35]

7. Zdroje a literatura

- [1] HRADÍLEK, Zdeněk, LÁZNIČKOVÁ, Ilona, KRÁL, Vladimír. *Elektrotepelná technika*. Praha: ČVUT, 2011, ISBN 978-80-01-04938-9.
- [2] EUROPEAN PATENT OFFICE, *DE518499 (C) — 1931-02-16* [online]. [cit. 12.2.2015]. Dostupné z: http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio;jsessionid=iGTwDJtUMowwOwbwCuUmpG3c.espacenet_levelx_prod_3?FT=D&date=19310216&DB=worldwide.espacenet.com&locale=en_EP&CC=DE&NR=518499C&KC=C&ND=5
- [3] CONSARC, *What is induction?* [online]. [cit. 12.2.2015]. Dostupné z: <http://consarc.com/what-is-induction/>
- [4] MÜHLBAUER, Alfred. *HISTORY OF INDUCTION HEATING & MELTING*, Essen: Vulkan-Verlag GmbH, 2008, ISBN 978-3-8027-2946-1
- [5] WIKIPEDIE, *Maxwellovy rovnice* [online]. [cit. 20.2.2015]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Maxwellovy_rovnice
- [6] *Maxwellovy rovnice a okrajové podmínky* [online]. [cit. 22.2.2015]. Dostupné z: http://www.fd.cvut.cz/personal/janes/Elektrotechnika1/Prednasky prezentace/Predn06_Terminologie_Maxw_Jednotky.pdf
- [7] *Poynting vector* [online]. [cit. 26.2.2015]. Dostupné z: http://www.radartutorial.eu/07.waves/pic/poynting_vector.print.png
- [8] *Skin depth* [online]. [cit. 26.2.2015]. Dostupné z: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f3/Skin_depth_by_Zureks.png/640px-Skin_depth_by_Zureks.png
- [9] RADA Josef, a kolektiv. *Elektrotepelná technika*. Praha: SNTL, 1985.
- [10] *Válcový souřadný systém* [online]. [cit. 26.2.2015]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F2/F2k21b-cs1.gif>
- [11] LANGER, Emil, KOŽENÝ, Jiří. *Elektrotepelná zařízení indukční: základy teorie, výpočty a konstrukce*. 1. vyd., Plzeň: VŠSE, 1982.
- [12] LANGER, Emil. *Teorie indukčního a dielektrického tepla*. Praha: Academia, 1979.
- [13] SUZUKI, Masahiro, TSURUMAKI, Kunisuke. *PROMISING TECHNOLOGY FOR THE MELTING OF DISMANTLED METAL BY AN INDUCTION COLD CRUCIBLE* [online]. [cit. 28.2.2015]. Dostupné z: <http://www.wmsym.org/archives/1998/html/sess52/52-04/52-04.htm>

- [14] SUSEN. *Studený kelímek* [online]. [cit. 28.2.2015]. Dostupné z: http://susen2020.cz/wp-content/uploads/2012/11/studený_kelimek_corium.png
- [15] ENPEDIE. *Studený kelímek* [online]. [cit. 28.2.2015]. Dostupné z: http://enpedie.cz/wiki/Studen%C3%BD_kel%C3%ADmek
- [16] ZAJACOVÁ, Nikola. *Vysokoteplotní tavení materiálů ve studeném kelímku*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická.
- [17] KUDRYASH, Maxim. *Experimental investigation of induction melting in cold crucible for high temperature processing of oxides using HF transistor power supply*. Disertační práce. Der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik der Gottfried Wilhelm Leibnitz Universität Hannover.
- [18] INSTITUT FÜR ELEKTROPROZESSTECHNIK, *Induktives Skull-Melting von innovativen Materialien* [online]. [cit. 8.3.2015]. Dostupné z: http://www.etp.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/Broschuere_Skull.pdf
- [19] HAVLOVÁ, Zuzana. *Vhodné kmitočty pro tavení různých materiálů ve studeném kelímku*, Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická.
- [20] KOŽENÝ, Jiří, a kolektiv. *Power losses in induction furnace with cold crucible with different segments shape* [online]. [cit. 15.5.2015]. Dostupné z: http://ek702p10-ket.fel.zcu.cz/images/Rocnik2014/Cislo1_2014/r8c2c4.pdf
- [21] *Cold crucible* [online]. [cit. 24.2.2015]. Dostupné z: <http://www.idealvac.ir/wp-content/uploads/2013/12/92-cold-crucible.jpg>
- [22] WM SYMPOSIA. *Cold crucible* [online]. [cit. 24.2.2015]. Dostupné z: <http://www.wmsym.org/archives/1998/html/sess57/57-03/f2.gif>
- [23] HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektrotepelná technika*. – Technická univerzita Ostrava, 1996.
- [24] GOMBERT, Dirk, RICHARDSON, John. *Cold Crucible Induction Melter Technology: Results of Laboratory Directed Research and Development* [online]. [cit. 6.3.2015]. Dostupné z: <http://www5vip.inl.gov/technicalpublications/Documents/3024978.pdf>
- [25] ROBOTERM CHOTĚBOŘ, *Tyristorové měniče kmitočtu pro indukční ohřev s výstupním kmitočtem 0,2 – 10kHz* [online]. [cit. 6.3.2015]. Dostupné z: <http://www.roboterm.cz/produkty/menice-kmitoctu/0-2-10-khz-nad-100kw>
- [26] NOVÁK, Zdeněk. *Zdroje pro vysokofrekvenční ohřevy*. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická.

- [27] *Magnetic Control in Cold Crucible Melting Furnace* [online]. [cit. 24.4.2015]. Dostupné z: <http://image.slidesharecdn.com/compositematerialsformagneticfieldcontrolinepmss-120320151713-phpapp02/95/composite-materials-for-magnetic-field-control-in-epm-10-728.jpg?cb=1404746014>
- [28] TAYADE, Rahul, SHWETA, Pardeshi. *CCIM-NEW ERA OF HLW MELTERS* [online]. [cit. 26.4.2015]. Dostupné z: http://iraj.in/up_proc/pdf/56-139633620644-48.pdf
- [29] *Cold crucible* [online]. [cit. 20.4.2015]. Dostupné z: <http://creta.grenoble.cnrs.fr/images/cold%20crucible.JPG>
- [30] SUZUKI, Masahiro, FUKUMURA, Nobuo, MIYAO, Hidehiko, TANAKA, Tsutomu, YOSHIDA, Naotsugu, IKENAGA, Yoshiaki. *EVOLUTION OF CONTINUOUS MELTING AND DECONTAMINATION TECHNOLOGY FOR DISMANTLED METAL BY AN INDUCTION COLD CRUCIBLE* [online]. [cit. 20.4.2015]. Dostupné z: <http://www.wmsym.org/archives/2000/pdf/11/11-07.pdf>
- [31] Schematic explanation of cold crucible induction casting for polycrystalline silicon ingot [online]. [cit. 22.4.2015]. Dostupné z: <http://www.dw-inductionheating.com/uploadfile/20121119/20121119145719686.jpg>
- [32] TAKAKI, Seiichi, ABIKO, Kenji. *Purification of Cobalt, Nickel, and Titanium by Cold-Crucible Induction Melting in Ultrahigh Vacuum* [online]. [cit. 29.4.2015]. Dostupné z: <https://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/47/01/156.pdf>
- [33] ROACH, J. A., LOPUKH, D. B., MARTYNOV, A. P., POLEVODOV, B. S., CHEPLUK, S. I.; *Advanced Modeling of Cold Crucible Induction Melting for Process Control and Optimization* [online]. [cit. 29.4.2015]. Dostupné z: <http://www5vip.inl.gov/technicalpublications/Documents/3901036.pdf>
- [34] BOJAREVICS, V., PERICLEOUS, K., HARDING, R. A., WICKINS, M.; *Cold Crucible Melting of Reactive Metals Using Combined DC and AC Magnetic Fields* [online]. [cit. 3.5.2015]. Dostupné z: http://www.researchgate.net/profile/Valdis_Bojarevics/publication/233784716_Cold_crucible_melting_of_reactive_metals_using_combined_DC_and_AC_magnetic_fields/links/0912f50ff15d4886e3000000.pdf

- [35] INDUSTRIAL HEATING, *Induction Skull Melting Offers Ti Investment Casting Benefits* [online]. [cit. 3.5.2015]. Dostupné z: <http://www.industrialheating.com/articles/83906-induction-skull-melting-offers-ti-investment-casting-benefits>
- [36] *Circular motion* [online]. [cit. 3.5.2015]. Dostupné z: http://www.spaceflight.esa.int/impress/text/education/Images/Circular_Motion/Image_042.png
- [37] *Czochralski process* [online]. [cit. 3.5.2015]. Dostupné z: http://solarcellcentral.com/images/czochralski_process.jpg
- [38] *Crystal growth* [online]. [cit. 10.5.2015]. Dostupné z: http://www.physik.uni-augsburg.de/exp6/research/crystalgrowth/crystalgrowth_e.shtml
- [39] NIEMANN, Benjamin, NACKE, Bernard, KUDRYASH, Maxim. *New innovative induction system for the production of pure high temperature glasses* [online]. [cit. 10.5.2015]. Dostupné z: <http://www.leonardo-energy.info/sites/leonardo-energy/files/root/uie2008/o27.pdf>
- [40] *Marcoule vitrification process* [online]. [cit. 12.5.2015]. Dostupné z: http://www.lyonalacarte.com/IMG/jpg/marcoule_vitrification_process.jpg
- [41] *Radioaktivní odpady* [online]. [cit. 12.5.2015]. Dostupné z: http://ceg.fsv.cvut.cz/ceg-old/CZ/ceg-uvod/02_ukladani.htm#rozd%C4%9Blen%C3%AD%20odpad%C5%AF
- [42] GRUBER, P., TRONCHE, E., LEDOUX, A., LABE, V., HOLLEBECQUE, J-F., LACOMBE, J., LADIRAT, C.; *Limited Increase of Particle Entrainment in the Off-Gas System of a Cold Crucible Induction Melter Compared with a Joule-Heated Metal Melter for HLLW Vitrification* [online]. [cit. 15.5.2015]. Dostupné z: <http://www-ist.cea.fr/publica/exl-doc/201000006449.doc>
- [43] LEMONNIER, S., LABE, V., LEDOUX, A., NONNET, H., GODON, N.; *Methodology of Qualification of CCIM Vitrification Process Applied to the HighLevel Liquid Waste from Reprocessed Oxide Fuels* [online]. [cit. 15.5.2015]. Dostupné z: <http://www.wmsym.org/archives/2012/papers/12438.pdf>
- [44] SOBOLEV, Igor, DMITRIEV, Serguei, LIFANOV, Fedor, TARASOV, Vadim. *COLD CRUCIBLE VITRIFICATION OF RADIOACTIVE WASTE* [online]. [cit. 15.5.2015]. Dostupné z: <http://www.wmsym.org/archives/1997/sess13/13-18.htm>
- [45] SUSEN, *Labolator studených kelímků* [online]. [cit. 15.5.2015]. Dostupné z: <http://susen2020.cz/vyzkum/vyhled-2015-infrastruktura-projektu-susen/laborator-studenych-kelimku/>