

# Jaderná energie Jadrová energia

Základní úlohou časopisu „Jaderná energie/Jadrová energia“ je přispívat k úrovni kultury jaderné bezpečnosti. Časopis je psaný v českém a slovenském jazyce, vědecké a odborné články, abstrakty a anotace též v anglickém jazyce. Časopis vychází čtyřikrát ročně nákladem 400 výtisků a v elektronické podobě, která je volně dostupná na adrese [jadernaenergie.online](http://jadernaenergie.online)

## OBSAH ČASOPISU JE ZAMĚŘEN NA:

- jadernou bezpečnost a radiační ochranu s důrazem na ochranu životního prostředí, zdraví profesionálních pracovníků a obyvatelstva,
- výzkum, vývoj a nové technologie,
- provoz a výstavbu jaderných elektráren,
- zpracování a ukládání radioaktivních odpadů,
- aplikace radioizotopů a ionizujícího záření,
- aktuální informace z dozorných orgánů,
- vzdělávání a rozvoj know-how.

## Vydavatel:

Centrum výzkumu Řež s.r.o.  
Hlavní 130, Řež  
250 68 Husinec  
Česká republika  
IČO: 26722445

Úrad jadrového dozoru SR  
Bajkalská 27  
P.O.Box 24  
820 07 Bratislava  
Slovenská republika  
IČO: 30844185

## Redakční rada:

Ing. Aleš John, MBA – předseda  
Ing. Daneš Burket, Ph.D., doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D., Ing. Jiří Duspiva, PhDr. Tomáš Ehler, MBA,  
Ing. Miroslav Hrehor, Ing. Jiří Hůlka, prof. Ing. Jan John, CSc., Ing. František Pazdera, CSc.,  
Ing. Alena Rosáková, prof. Ing. Vladimír Slugeň, DrSc., Mgr. Petr Šuleř, Ing. Radek Trtílek,  
Ing. Zdeněk Típek, Mgr. Miriam Vachová, Mgr. Ilona Vysoudilová, RNDr. Marek Vyšinka, Ph.D.,  
RNDr. Vladimír Wagner, CSc., Ing. Jan Zdebor, CSc.

## Grafika, sazba, jazykové korektury a tisk:

TOP Partners, s.r.o.  
Classic 7 Business Park  
Jankovcova 49  
170 00 Praha 7  
Česká republika

## Redakce:

Michal Šafránek – šéfredaktor  
redakce@jadernaenergie.online  
+420 775 374 384  
Mgr. Tereza Smékalová, Ing. Jiří Kuf,  
Ing. Jan Procházka, Jan Trejbal.

## Adresa redakce:

Centrum výzkumu Řež s.r.o.  
Hlavní 130, Řež  
250 68 Husinec  
Česká republika

## Registrace MK ČR

Časopis Jaderná energie/Jadrová energia  
byl zapsán do evidence periodického tisku  
Ministerstva kultury České republiky a bylo  
mu přiděleno evidenční číslo MK ČR E 4671.  
ISSN 2694-9024

## Speciální číslo/2020, ročník 1 [66]

Vychází 10. 9. 2020

# Indukční tavba oxidu hlinitého v zařízení studeného kelímku

Ing. David Rot, Ph.D.

Tento článek popisuje průběh experimentální indukční tavby  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve studeném kelímku (CC), způsobem označovaným jako induction skull melting (ISM). Průběh experimentu spočívá v přípravě segmentového CC na tavbu. Přehřátí startovacího materiálu (hliníku) a spuštění exotermické reakce, čímž dojde k roztavení části vsázky. Postupné roztavení celé vsázky. Výdrž vsázky v ustáleném stavu při požadované teplotě. Řízené chlazení vsázky. Vyjmutí ingotu oxidu hlinitého ze studeného kelímku.

This paper describes the experimental induction skull melting (ISM) of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in a cold crucible (CC). The realization of the experiment consists of the preparation of segmental CC for melting. Starting-material (aluminum) overheating and initiation of an exothermic reaction. Gradual melting of the entire load. Steady-state load endurance at the required temperature. Load controlled cooling. Removing the corundum ingot from the cold crucible.

## ÚVOD

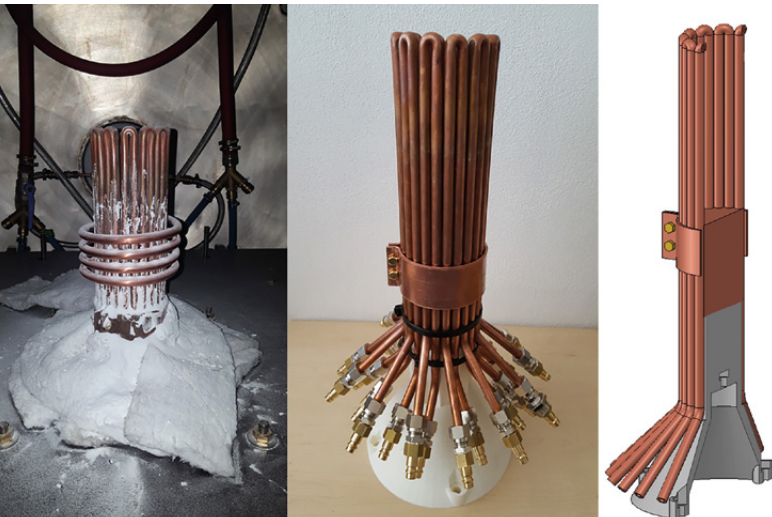
Úkolem zde popisované tavby bylo získat polykrytalický korundový ingot. Pro realizaci tavby bylo nezbytné navrhnout vhodný studený kelímek s ohledem na hloubku vniku vířivých proudů do taveniny (tekuté  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) a na výkon vysokofrekvenčního generátoru studeného kelímku.

Vlastní realizace experimentu proběhla v několika fázích: příprava segmentového studeného kelímku na tavbu, vložení vsázky (čistého oxidu hlinitého ve formě prášku) do studeného kelímku, vložení startovacího materiálu (čistý hliník) do vsázky. Tavba za-

čala spuštěním indukčního ohřevu, který měl za následek přehřátí startovacího materiálu a následné spuštění exotermické reakce. Tímto způsobem došlo k roztavení části vsázky. Postupně s tím, jak se v důsledku změny skupenství vsázky snižovala její výška, docházelo k jejímu dosypávání do studeného kelímku. Zároveň byl během tavby realizován postupný vertikální posun studeného kelímku vůči induktoru a regulován výkon tak, aby došlo k roztavení celé vsázky. Následovalo udržení vsázky po požadovanou dobu v ustáleném stavu při teplotě 2 500 °C. Po splnění výdrže na teplotě došlo k ukončení indukčního ohřevu a k řízenému chlazení vsázky.

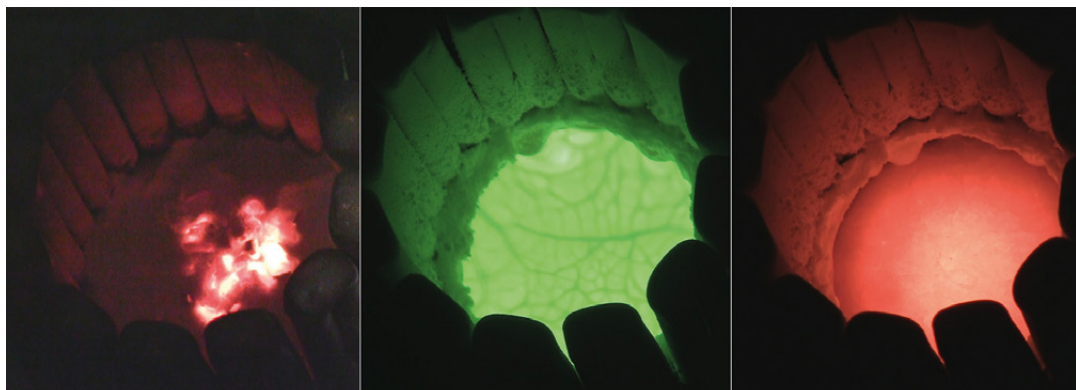
## NÁVRH STUDENÉHO KELÍMKU

Prvním krokem přípravy tavby oxidů kovů je volba vhodných rozměrů studeného kelímku. Výchozím kritériem návrhu jsou fyzikálně-chemické vlastnosti taveniny daného oxidu či dané směsi oxidů kovů. V tomto ohledu má dominantní vliv elektrická vodivost, její velikost však značně závisí na jakosti použitých oxidů kovů a je silně závislá i na teplotě taveniny.



Obr. 1: Zobrazený studený kelímek je tvořen naohýbanými měděnými trubkami o vnějším průměru 10 mm (2 mm tloušťka stěny). Tyto trubice jsou prostřednictvím bandáže přitlačeny do axiálních povrchových drážek masivního měděného dna. V levé části obrázku je zobrazen studený kelímek po ukončení procesu tavby. Uprostřed je celkový pohled na reálný studený kelímek. V pravé části obrázku je znázorněno vnitřní uspořádání studeného kelímku.

Obr. 2: Vlevo na obrázku je vidět vnitřek studeného kelímku s přehřátým startovacím materiálem před začátkem exotermické reakce, uprostřed je vidět tavenina v ustáleném stavu a vpravo pak chladnoucí tavenina.



Znalost elektrické vodivosti taveniny oxidů kovů je nezbytná pro správné určení hloubky vniku naindukovaných proudů. Ze znalosti hloubky vniku a potřebného tepelného výkonu nutného k roztavení vsázky je možné navrhnout vhodné rozměry studeného kelímku. Studený kelímek je tvořen dvojicemi ohnutých a jednostranně spojených měděných trubic, tzv. segmentů, masivním měděným dnem a měděnou bandáží s mosaznými šrouby, která vše drží pohromadě. V našem případě je použit ještě plastový podstavec pro uchycení kelímku k manipulačnímu stolu. V tomto experimentu použitý studený kelímek je ukázán na obr. 1.

#### REALIZACE EXPERIMENTU

Průběh samotné tavby se skládá z několika nezbytných kroků.

#### PŘÍPRAVA KELÍMKU NA TAVBU

Před vložením vsázky, tvořené oxidy kovů práškové konzistence, do kelímku je potřeba ze vsázky a vody vytvořit kašovitou hmotu, kterou se vyplní mezery mezi trubicemi kelímku, aby prášková vsázka ze studeného kelímku po nasypání neunikala.

Po zaschnutí hmoty na trubicích se do studeného kelímku nasype přibližně polovina z celkového množství vsázky určené k tavbě. Při nasypávání vsázky do studeného kelímku je nutné vsázku průběžně pečovat. Následně se do vsázky vloží startovací materiál a znovu se vsázka i se startovacím materiálem upěchuje.

#### STARTOVACÍ FÁZE

Nejnáročnější fáze celého procesu. Během této fáze je nutné přehřát vložený startova-

cí materiál a spustit exotermickou reakci. Tím dojde v okolí startovacího materiálu ke změně fáze vsázky, ta tím pádem začne být i elektricky vodivá a elektromagnetická indukce na ni nyní bude působit přímo. V tomto okamžiku je potřeba začít s přisypáváním vsázky do kelímku, protože změnou fáze se snižuje její objem. Ten je však nutné udržovat konstantní.

Zároveň je nezbytné v okamžiku změny fáze vsázky začít se snižováním výkonu generátoru: z plného výkonu, při kterém probíhá startovací fáze, nastavit takovou hodnotu výkonu, aby nedošlo k poklesu teploty již roztavené vsázky pod její bod tavení, ale zároveň nedovolit její výrazné lokální přehřátí. V případě tavby  $Al_2O_3$  jsme regulovali výkon na teplotu vsázky 2 500 °C.

Současně s výše uvedenými kroky je potřeba měnit pozici/výšku studeného kelímku vůči induktoru takovým způsobem, abychom nejvyšší Jouleovy ztráty vytvářeli na rozhraní vsázky již tekuté a ještě pevné. To vše za občasného přisypávání zbytku vsázky tak, aby pozice hladiny vsázky vůči dnu studeného kelímku zůstávala pokud možno neměnná.

#### TAVBA VSÁZKY

Pokud se výše uvedené kroky podaří úspěšně zvládnout, dojde k roztavení vsázky uvnitř celého kelímku s výjimkou té části vsázky, která je v těsném kontaktu s intenzivně chlazenými trubicemi studeného kelímku. Z tohoto materiálu se na rozhraní postupně vytváří skull vrstva. Mezi touto skull vrstvou a kelímkem se zároveň tvoří vzduchová mezera řádově o velikosti desetin milimetrů.

**VÝDRŽ VSÁZKY NA TEPLOTĚ**

Roztavenou vsázku je nutné podržet při konstantní teplotě v ustáleném stavu tak dlouho, než dojde k její homogenizaci, aby bylo dosaženo požadované kvality výsledného polykrystallického korundového ingotu.

**ŘÍZENÉ CHLADNUTÍ VSÁZKY**

Postupným snižováním výkonu frekvenčního měniče a posuvem studeného kelímku vůči induktoru lze ovlivnit proces chlazení vsázky dle požadavků na výsledný ingot. Pohledy na taveninu ve vybraných fázích ukazuje obr. 2.

**VYJMUTÍ VSÁZKY ZE STUDENÉHO KELÍMKU**

Konstrukce kelímku je provedena tak, aby se po vychladnutí vsázky a sejmutí bandáže nechala rozebrat. Rozebrání spočívá v odstranění bandáže držící jednotlivé segmenty (dvojice jednostranně spojených trubíc) přitlačené do drážek axiálně vyfrézovaných při okraji dna. Obr. 3 uprostřed ukazuje studený kelímek po odstranění bandáže a segmentů, tedy pomocný plastový přípravek, masivní měděné dno a korundový ingot (produkt tavy). Vlevo na tomto obrázku je ingot vsázky vcelku a vpravo pak korundový ingot vsázky rozdělený na dvě poloviny.

**ZÁVĚR**

Proces tavy ve studeném kelímku není ani zdaleka triviální záležitostí, vyžaduje zkušenosti a připravenost operátorů okamžitě reagovat na dění uvnitř studeného kelímku. Především je nutné bedlivě sledovat stav tavené vsázky.

Mezi nejobtížnější okamžiky patří přechod ze startovací fáze do provozu s roztavenou vsázkou. Při tomto přechodu je nutné přisypávat vsázku do taveniny o teplotě v řádu tisíců stupňů Celsia a mít na zřeteli blízkost induktoru s napětím 10 kV vůči pracovní komoře. Během celého procesu tavy je potřeba pracovat s výkonem vysokofrekvenčního generátoru, regulovat polohu studeného kelímku vzhledem k induktoru a také regulovat ventilační systém pracovní komory.

Toto zařízení je především vhodné pro výzkum fázových diagramů oxidů kovů, nových materiálů na bázi oxidů kovů, jako je např. biokeramika, výrobu umělých drahých kamenů, ale také např. k simulaci jaderných havárií.

Prezentované výsledky byly finančně podpořeny Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy – projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována na velké infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108 a CZ.02.1.01/0.0/0.0/15\_008/0000293.



Obr. 3: Vlevo je celý ingot po vyjmutí ze studeného kelímku, uprostřed je vidět ingot stojící na odstrojeném studeném kelímku (podstavec, měděné dno, ingot), vpravo pak vnitřek ingotu po jeho rozdělení na dvě poloviny.