

## Modelování startu tavby oxidů kovů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku

D. Rot<sup>1</sup>, J. Kožený<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Katedra elektroenergetiky a technické ekologie, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni, Univerzitní 26, Plzeň

E-mail : [rot@kee.zcu.cz](mailto:rot@kee.zcu.cz), [kozyeny@kee.zcu.cz](mailto:kozyeny@kee.zcu.cz)

### Anotace:

Článek se zabývá možnostmi nastartování indukční tavby oxidů kovů (respektive dalších materiálů) ve studeném kelímku. Tato aplikace bývá často označována jako skull-melting-methode, jelikož tavený materiál se taví sám v sobě, tzn.: tavenina nepřijde do kontaktu s jiným materiálem. V článku se zabýváme možnostmi modelování určitých konfigurací studeného kelímku pomocí multifyzikálního software ANSYS. Na základě úvahy a výsledků z numerických simulací můžeme pak za určitých okolností stanovit optimální podmínky pro zahájení tavby oxidů kovů, které nelze v jejich pevném (sytkém) skupenství a za běžné pokojové teploty indukčně ohřívat.

The article deals with various options of starting the induction melting process of metal oxides and other materials in a cold crucible. This application is often referred to as skull-melting-method because the to-be-melted material gets melted in its own body. That means that the melt doesn't get exposed to foreign materials. For some of the possible design options number of FEM models created by ANSYS multiphysics software is provided. The numerical simulation and the theoretical description of the problem can be used as bases for determining the optimum conditions for starting the melting process of metal oxides that would not be possible to melt at ambient temperature while there are in their solid state.

### ÚVOD

Metodou indukčního ohřevu ve studeném kelímku (skull-melting-methode) se zabývá řada renomovaných pracovišť po celém světě. [4] Mezi největší přednosti této metody patří možnost dosahovat při tomto způsobu ohřevu teplot nad 3000 °C a zároveň zabránit kontaminaci taveného materiálu (vsázky) v důsledku kontaktu s jiným materiálem, neboť materiál se taví sám v sobě a v místech jeho styku s okolím (kelímkem) nedochází k jeho roztavení, neboť kelímek je intenzivně chlazen. Tato technologie nabízí i možnosti řízené krystalizace materiálů.

### PROBLEMATIKA STUDENÉHO KELÍMKU

Principiálně existují dvě varianty studeného kelímku. První možností je případ, kdy sám induktor tvoří přímo stěnu kelímku a musí být velmi intenzivně chlazen. Druhou možností je kelímek vytvořený z dutých měděných vodičů, kterými protéká chladicí médium a induktor je umístěn vně kelímku, tak jak tomu bývá u indukčních kelímkových pecí, viz obr. 2. Nejčastěji se pomocí studeného kelímku taví materiály se špatnou elektrickou vodivostí jako oxidy kovů a sklo. Právě v případě těchto materiálů nastávají určité komplikace s nastartováním tavby, jelikož tyto materiály nelze z pokojové teploty přímo indukčně ohřívat a je tedy nutné nějakým způsobem

jejich tavbu nastartovat. V závislosti na taveném materiálu je pak možné zvolit optimální řešení.

Jednou z možností je, že do vsázky přidáme takový materiál, který je možné za daných okolností roztavit přímo z daných počátečních podmínek. Od roztaveného startovacího materiálu se následně začne tavit i vsázka a dojde k „řetězové reakci“. Tavbu je však potřeba regulovat, aby se neroztavila veškerá vsázka, ale aby v místech dotyku taveného materiálu s kelímkem zůstala vrstva vsázky neroztavená, která zabraňuje spojení taveniny přímo s kelímkem, a tím ho ochraňuje před roztavením či poškozením. Kelímek je tedy potřeba masivně chladit a regulovat výkon přenášený do vsázky, tzn. postupně s tím jak se šíří tavenina od středu kelímku (z místa uložení startovacího materiálu) k okraji kelímku přenášený výkon do vsázky snižovat.

V tomto případě, ale může nastat situace, kdy si „startovacím materiálem“ kontaminujeme vsázku, použitý materiál je tedy potřeba volit nejen na základě potřebných fyzikálních materiálových vlastností, ale i s ohledem na jeho složení chemické. V ideálním případě, jako např. při tavení  $ZrO_2$ , lze k nastartování tavby použít metalický zirkon, který vsázku nijak negativně neovlivní.

Jsou ale případy, kdy uvedená možnost není a musí se do vsázky přidat materiál, který ovlivnění výsledného produktu vsázky způsobit může. Pak se startovacího materiálu vkládá jen minimální množství, případně se odstraní po nastartování tavby. Případně na použitém startovacím materiálu nezáleží, tak je tomu třeba u vitifikací. Např. při tavbě YBCO

se jako startovací materiál používá grafitový kroužek, který se po nastartování tavby odstraní. Při odstraňování však může docházet ke komplikacím, jelikož je často nutné provádět tavbu ve vakuu či pod ochrannou atmosférou a nutnost vyjmout startovací materiál ze vsázky toto dále komplikuje.

Další možností by mohlo být pomocí jiného zdroje tepla roztavit určitou část vsázky tak, aby další ohřev elektromagnetickou indukcí mohl pokračovat samostatně. Zde dle našeho názoru připadá v úvahu možné použití např. plynového hořáku, který však produkuje spaliny a může negativně ovlivnit čistotu či kvalitu výsledného produktu tavby. Další možností může za určitých okolností být použití elektrického oblouku či laserového paprsku.

V případě startování tavby pomocí vloženého startovacího materiálu by bylo možné uvažovat i další „hybridní variantu“ ohřevu startovacího materiálu. Ta by spočívala v použití druhého induktoru, který by se ze shora umístil nad startovací materiál. Výhodou by byla možnost provozovat tento induktor na mnohem nižší frekvenci při nesrovnatelně nižším výkonu, čímž by se mohly ušetřit finanční prostředky na elektrickou energii. Nevýhodou by však byla nutnost induktor po započítání tavby odstranit, aby nedošlo následným působením primárního induktoru k jeho poškození.

Výkony induktorů používaných pro aplikaci studeného kelímku s chlazeným měděným kelímkem se pohybují obvykle v rozmezí 50 – 400 kW a při frekvencích 90 – 5000 kHz.

Tuto metodu, mimo mnoha jiných aplikací, lze také použít např. pro účely vitifikace různých odpadů i radioaktivních. Právě metodou zatavování nebezpečného radioaktivního odpadu a tedy jeho bezpečným uložením se zabývají i v ÚJV v Řeži, se kterým naše pracoviště na této problematice bude spolupracovat. Podíleli jsme se s nimi i na projektu Jaderný palivový cyklus v rámci operačního programu EU, který ÚJV v Řeži získal. Díky projektu vznikne na našem pracovišti laboratoř s patřičným vybavením pro tavení ve studeném kelímku.

## MATEMATICKÝ MODEL

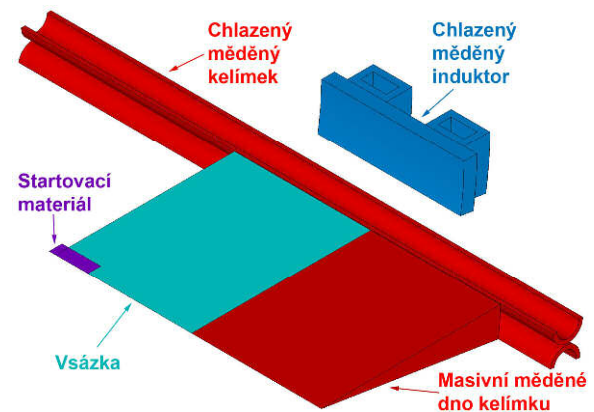
V tomto příspěvku, jak jeho název napovídá, se zaměřujeme na možnosti nastartování tavby ve studeném kelímku. Konkrétně sledujeme rozložení fyzikálních veličin elektromagnetického pole v 3D modelu studeného kelímku. Jedná se o teoretickou úvahu, při jejíž tvorbě jsme vycházeli z reálného zařízení, které je používáno v Německu na univerzitě v Hanoveru [4], [1], [2]. Jedná se o studený kelímk s měděnou chlazenou stěnou a jednozávitovým induktorem.

Na základě uvedené aplikace jsme vytvořili pomocí software ANSYS příslušný model. Z principu

přenosu energie do vsázky pro danou aplikaci jsme museli použít 3D model. Nejpřesnější částí bylo vytvořený model správně diskretizovat, aby se optimalizovala doba výpočtu a zůstala zachována přesnost řešení.

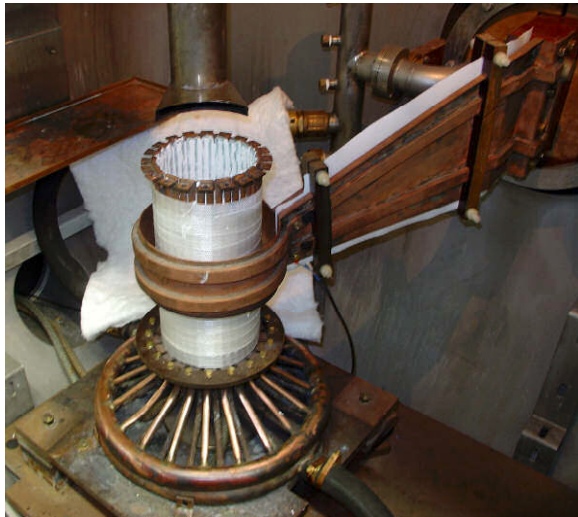
Důvodem obtížnosti je použitá frekvence v induktoru, kterou jsme nastavili na 100 kHz. Při takto vysoké frekvenci je nezbytné použití velmi malých elementů, např. pro měděné součásti modelu to znamená velikost hrany elementu řádově  $10^{-5}$  m. Podrobně jsou jednotlivé materiály uvedeny v tab. 1.

Nejprve jsme museli vybrat nejmenší symetrickou část z celého řešeného modelu, ta je zobrazena na následujícím obrázku.



obr. 1: Nejmenší symetrická část 3D modelu

Na obr. 1 je ukázán vytvořený geometrický model s popisem jednotlivých oblastí. Jako startovací materiál bylo použito metalického Zirkonu. Jako vsázka byl uvažován oxid zirkoničitý ( $ZrO_2$ ). Induktor je tvořen jedním závitem z masivní mědi a je chlazený kapalinou. Měděný kelímk je tvořen dutými lamelami a je taktéž chlazený vodou. Důležité je, že mezi jednotlivými lamelami jsou mezery menší než 1 mm, kterými do vsázky vstupuje radiálním směrem elektromagnetické pole. Pro představu, jak asi zařízení vypadá ve skutečnosti, přidávám obr. 2 zařízení z univerzity v Hanoveru [4].



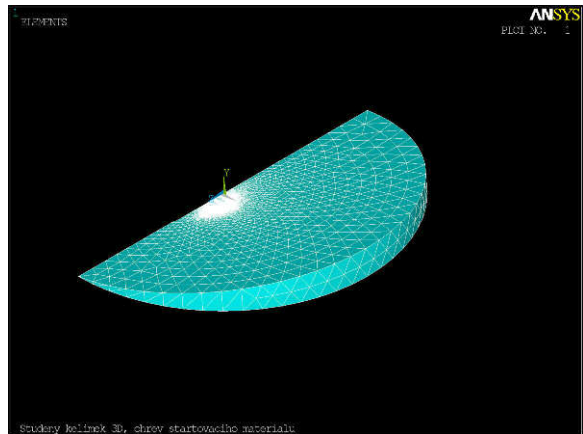
obr. 2: Reálné zařízení na univerzitě v Hanoveru, kterým jsme se inspirovali pro numerické řešení [4]

Následně jsme byli nuceni pro příslušné uvažované materiály a jejich fyzikální vlastnosti s ohledem na uvažovanou frekvenci určit diskretizaci jednotlivých oblastí modelu. Příslušné materiálové parametry pro řešení elektromagnetického pole i s odpovídající velikostí elementů pro jednotlivé materiály jsou v následující tabulce. Není však možné takto jemně diskretizovat celý model, ale pouze ty části oblastí, v nichž bude docházet k vytváření Jouleových ztrát. Tato vzdálenost přibližně odpovídá trojnásobku hloubky vniku naindukovaných proudů. Tedy korektně respektována hloubka vniku naindukovaných proudů je uvažována pro každou vodivou oblast na rozhraní oblastí v radiálním a axiálním směru.

tab. 1: Uvažované materiály s příslušnými velikostmi pro nastavení diskretizace 3D modelu

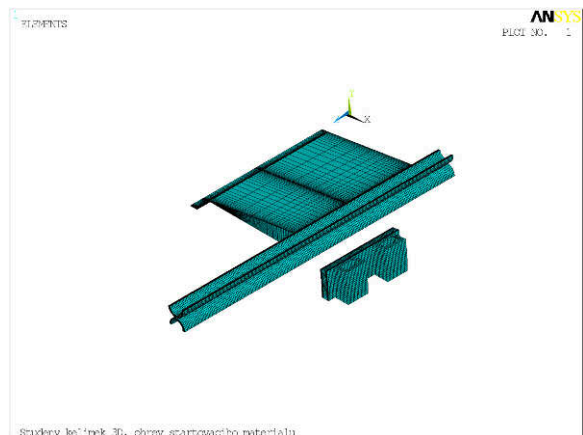
Frekvence [Hz]	1,00E+05					
Materiál	Vodivost [S.m] při 20 st. C	Rezistivita [ohm.m] při 20 st. C	Rel. permeabilita	Hloubka vniku [m]	Velikost elementu [m]	Vzdálenost jemné mesh od okraje [m]
Měď	5,80E+07	1,72E-08	1,00E+00	2,09E-04	8,04E-05	6,27E-04
ZrO2	1,00E+04	1,00E-04	1,00E+00	1,59E-02	6,12E-03	4,77E-02
Metalické Zr	2,38E+06	4,21E-07	1,00E+00	1,03E-03	3,97E-04	3,10E-03
YBCO	9,09E+02	1,10E-03	1,00E+00	5,28E-02	2,03E-02	1,58E-01
Grafit	1,11E+05	9,00E-06	1,00E+00	4,77E-03	1,84E-03	1,43E-02

Na základě uvedené tabulky jsme tedy diskretizovali příslušný model. Celý diskretizovaný 3D model je ukázán na obr. 3.

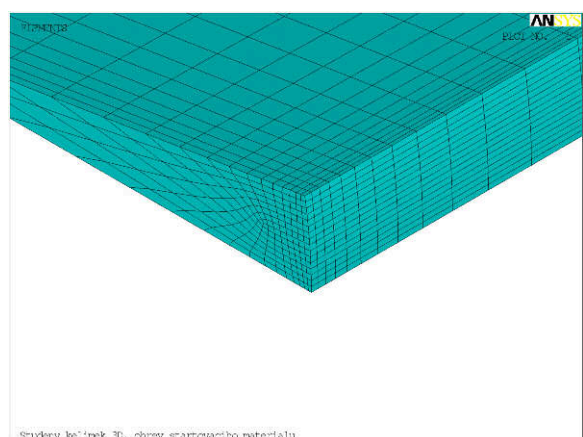


obr. 3: Celý diskretizovaný model

Detailní pohled na diskretizaci jednotlivých oblastí ukazujeme na následujících dvou obrázcích. Na obr. 4 se nachází 3D model bez okolního prostředí a na obr. 5 pak detailní pohled na diskretizovanou oblast startovacího materiálu.



obr. 4: Celý 3D model bez okolního prostředí



obr. 5: Detailní pohled na diskretizaci modelu startovacího materiálu

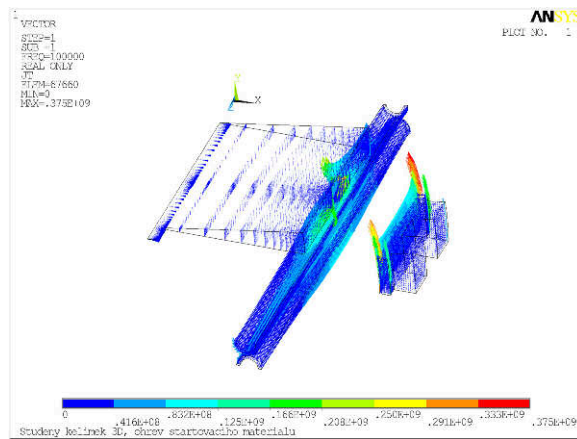
Při formulaci okrajových a počátečních podmínek zadání jsme opět vycházeli ze skutečného zařízení [4] a řešili jsme jej pro dvě různá geometrická uspořádání (poloměr induktoru byl v řešených modelech uvažován 0,22 m a 0,11 m, tomu odpovídají

poloměry vsázky 0,15 m a 0,075 m, mezi vsázkou a induktorem byly vždy umístěny lamely chlazeného měděného kelímku). Zde uváděné výsledky jsou pro model s větším poloměrem oblastí. Konkrétně jsme při formulaci vycházeli z příkonu měniče, kterým byl induktor studeného kelímku napájen, v případě uvažované tavby  $ZrO_2$  byl uvažovaný příkon 250 kW, při frekvenci téměř 100 kHz.

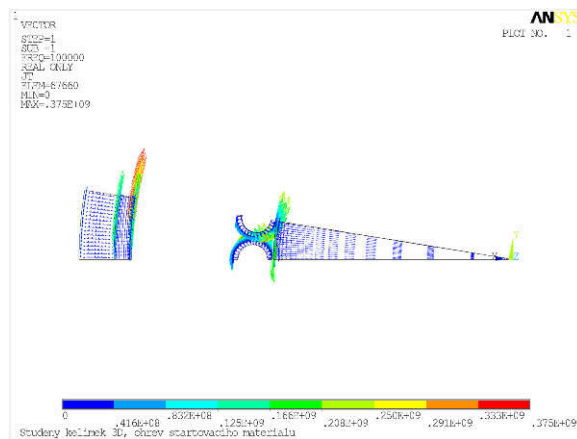
Pro roztavení startovacího materiálu (metalického zirkonu) jehož rozměry jsme si zvolili ( $r = 0,01$  m,  $v = 0,02$  m), je nutné dodat 70 kJ tepla, aby došlo ke zvýšení z teploty 20 °C na potřebných 3000 °C.

## VÝSLEDKY

Prvním krokem k určení správnosti modelu z fyzikálního hlediska bylo ověřit si orientaci proudových hustot v oblastech modelu s orientací proudové hustoty v induktoru.

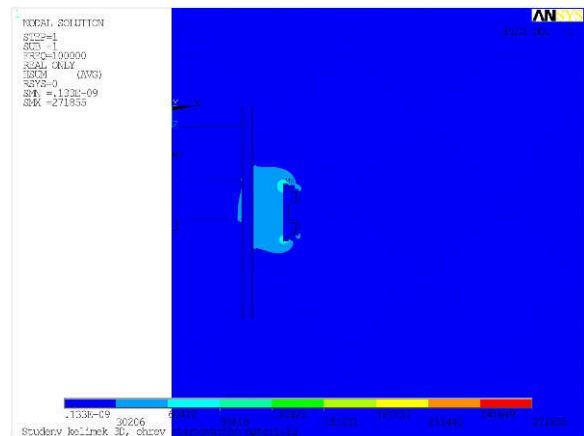


obr. 6: Rozložení proudové hustoty v 3D modelu studeného kelímku [ $A \cdot m^{-2}$ ]



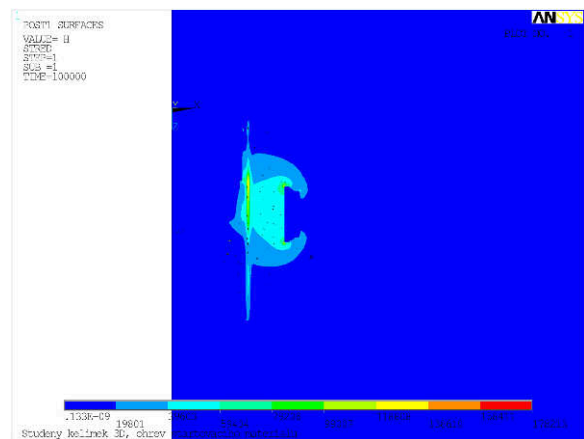
obr. 7: Rozložení proudové hustoty v 3D modelu studeného kelímku [ $A \cdot m^{-2}$ ]

Při podrobném zkoumání výsledků je zřejmé, že proudové hustoty vytvořené ve všech elektricky vodivých oblastech modelu (mimo induktoru) v důsledku působení vířivých proudů, mají opačný směr než proudová hustota v induktoru a jsou tedy rozloženy ve shodě s teoretickým předpokladem.



obr. 8: Rozložení intenzity magnetického pole, pohled z boku [ $A \cdot m^{-1}$ ]

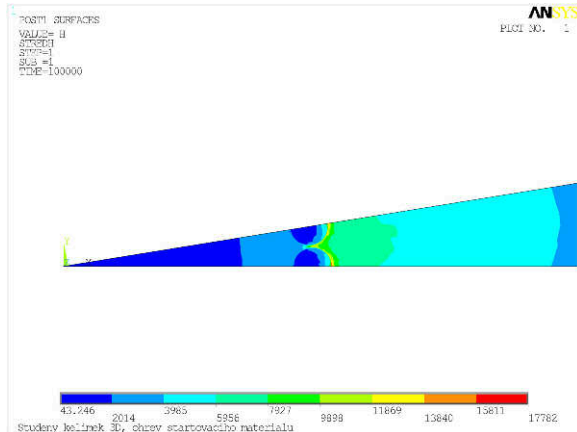
Na obrázku 8 je ukázáno rozložení intenzity magnetického pole v řezu středem chladicí měděné lamely. Ta tvoří stěnu studeného kelímku a je patrné, že vnitřek lamely je její stěnou magneticky odstíněn. Magnetické pole tedy do vsázky vniká především mezerami mezi jednotlivými kovovými lamelami, do kterých se indukují poměrně vysoké vířivé proudy. Další obrázek 9 pak názorně ukazuje, jakým způsobem se magnetické pole v radiálním směru dostává dovnitř měděného kelímku.



obr. 9: Rozložení intenzity magnetického pole, řez středem modelu, průběh intenzity magnetického pole mezi měděnými lamelami kelímku [ $A \cdot m^{-1}$ ]

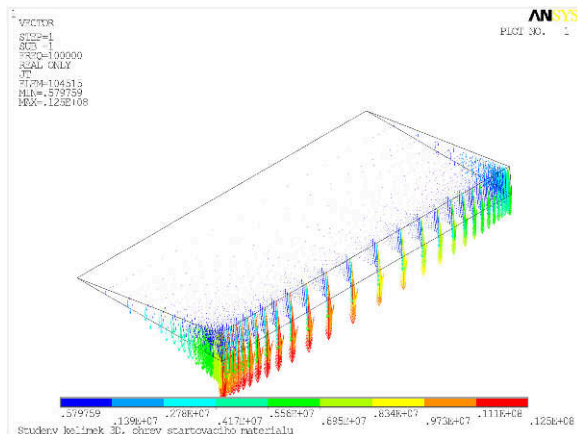
Pro úplnost ještě přidáváme řez modelem (obrázek 10) při pohledu shora na rozložení intenzity magnetického pole, který potvrzuje výše uvedené předpoklady o způsobu vniku elektromagnetického pole do studeného kelímku.



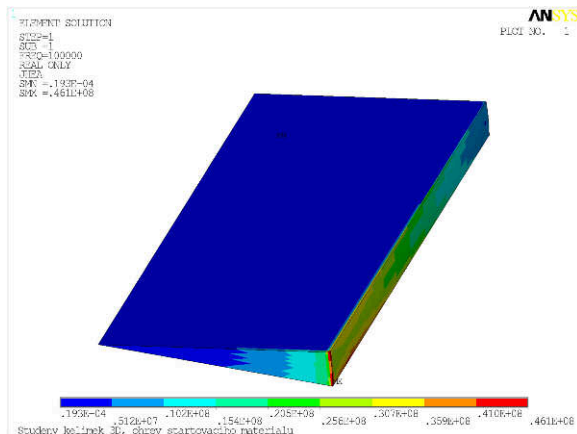


obr. 10: Rozložení intenzity magnetického pole, řez modelem při pohledu shora [ $\text{Am}^{-1}$ ]

Rozložení proudové hustoty ve startovacím materiálu ukazujeme na následujícím obrázku 11. Je patrné, že vířivé proudy se masivně vytvářejí jen v tenké vrstvičce pod povrchem startovacího materiálu. Na posledním obr. 12 z 3D simulace ukazujeme rozložení Jouleových ztrát v ohřivaném startovacím materiálu, které koresponduje s teoretickým předpokladem.

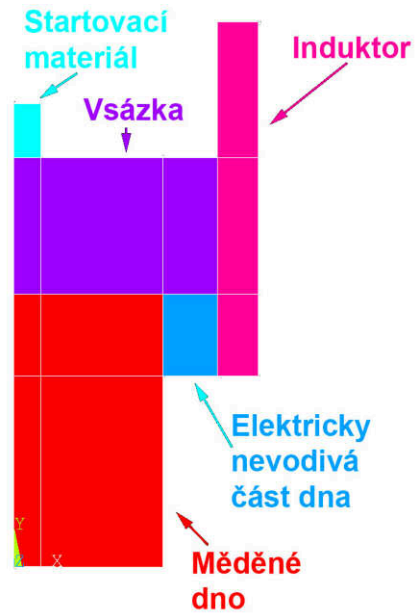


obr. 11: Rozložení proudové hustoty vektorově ve start. Materiálu [ $\text{Am}^{-2}$ ]



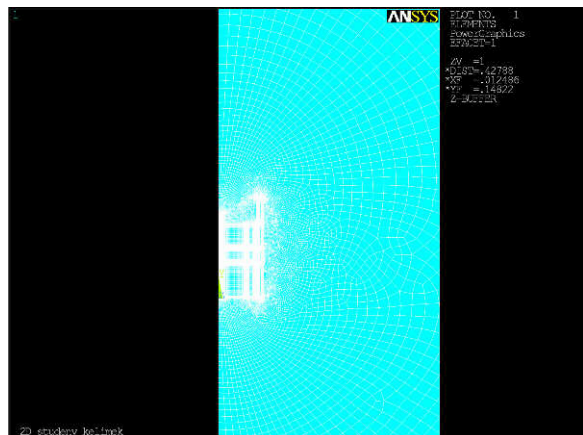
obr. 12: Rozložení Jouleových ztrát ve start. materiálu [ $\text{Wm}^{-3}$ ]

Pro ucelenost přehledu problematiky studeného kelímku přidáváme ještě řešení na zjednodušeném 2D modelu studeného kelímku ve variantě, kdy induktor přímo tvoří studený kelímek [2].



obr. 13: 2D model studeného kelímku (induktor je zároveň kelímek)

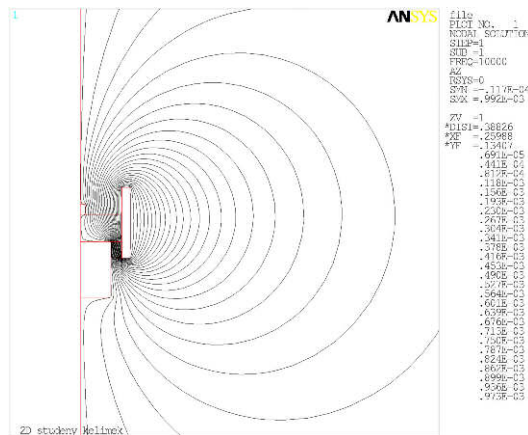
Studený kelímek v případě, kdy induktor přímo tvoří stěnu kelímku je z hlediska energetického efektivnější, ale v případě protavení kelímku hrozí větší škody než je tomu v případě, kdy je kelímek tvořen vodou chlazenými měděnými lamelami. Jednodušší je i matematický model tohoto uspořádání. Zde je možné díky dokonalé symetrii řešit problém jako 2D osově symetrický. Přesto bylo opět nezbytné dokonale diskretizovat model a správně respektovat použité materiály, vysokou frekvenci, počáteční a okrajové podmínky. Diskretizace uvažovaného 2D modelu je na následujícím obrázku 14.



obr. 14: Diskretizace 2D modelu pro použití vysoké frekvence

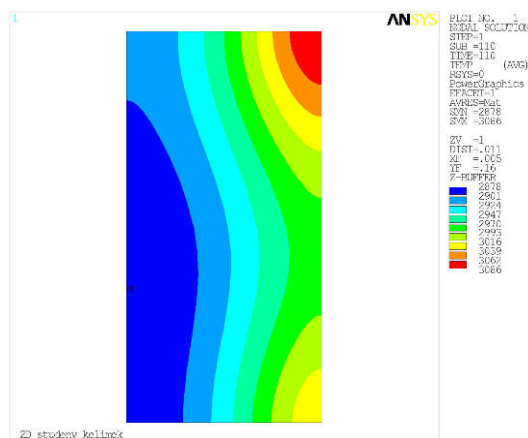
Rozložení siločar elektromagnetického pole ukazuje následující obrázek 15. Řešení proběhlo při frekvenci

o řád nižší, než tomu bylo v případě 3D modelu. Provedli jsme toto řešení jako slabě sdruženou úlohu a jen pro ilustrativní účely a pro získání elementárního pohledu na problematiku studeného kelímku.



obr. 15: Rozložení siločar elektromagnetického pole ve 2D modelu [ $\text{Wb m}^{-1}$ ]

V tomto námi uvažovaném případě by po 110 vteřinách ohřevu došlo k získání potřebné teploty ve startovacím materiálu, jak ukazuje následující obrázek.



obr. 16: Rozložení teplotního pole ve startovacím materiálu po 110 s ohřevu [T]

## ZÁVĚR

Řešená problematika je velice zajímavá a začátek naší spolupráce s Ústavem jaderného výzkumu v Řeži jistě přinese mnoho dalších praktických i teoretických poznatků problematiky studeného kelímku. Uvedené simulace a teoretický rozbor problematiky je pro naše pracoviště právě úvodem k chystané odborné spolupráci.

Uvedené případy ohřevu ve studeném kelímku jsou pouze vstupními pracemi inspirované dále uvedenou literaturou. V další práci se zaměříme na řešení teplotního pole s respektováním teplotních závislostí u jednotlivých komponent kelímku v případě 3D modelu. Posléze budeme zřejmě nuceni přikročit

i k modelování pohybu taveniny ve vsázce, což je i při využití super-počítačů stále poměrně náročná úloha. Nicméně technologie studeného kelímku se podle dosavadních zkušeností může uplatnit při výzkumu nových materiálů a při likvidaci nebezpečného odpadu.

Předpokládáme tedy, že 3D modelu tohoto typu studeného kelímku se budeme nadále věnovat a že se v první fázi zaměříme na řešení teplotního pole s respektováním teplotních závislostí jednotlivých komponent kelímku.

## LITERATURA

- [1] Behrens T., Kudryash, M., Nacke, B., Lopukh, D., Martynov, A., Loginov, I. Induction Skull Melting of Y 2O 3-BaO-CuO in a Cold Crucible. [Konference] // Proceedings of the International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing. - Hannover, 2003. - stránky 249-254.
- [2] Jekabsons N., Jakovics, A., Nacke, B. Model of Protective (Skull) Layer in the Inductor-Crucible Furnace [Konference] // International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing. - Hanover, 2003.
- [3] Nacke B. Modelling of Key Factors in Melting of Oxides in Inductor Crucible [Konference] // Proceedings of the Electromagnetic Processing of Materials International Conference. - Riga, 2003.
- [4] Nacke B., Behrens T. a Kudryash M. Schmelzen von Oxiden mit der Skull-Melting-Methode. [Konference] // Workshop Elektroprozesstechnik – Erwärmen und Schmelzen mit elektrothermischen und alternativen Verfahren. - Ilmenau : TU Ilmenau, 2004.
- [5] Niemann B., Nacke B. a Kudryash M. Investigation of mass and heat transfer of molten glass in the inductor crucible [Konference] // Proceedings of International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing (MEP2008). - Hanover, 2008.
- [6] Niemann B., Nacke, B., Kudryash, M. New innovative induction system for the production of pure high temperature glasses [Konference] // Proceedings of international UIE conference. - Cracow, 2008.
- [7] Pozniak I., Petchenkov, A. Special Tool for Investigation and Controlling of Induction Skull Melting Processes [Konference] // International Scientific Colloquium Modelling for Saving Resources. - Riga, 2001.