

## Raport stiintific

privind implementarea proiectului in perioada octombrie – decembrie 2011

### Activitatea 1.1. Dezvoltarea programului STHAMAS3D pentru a modela configuratia EMF cu 2 sau mai multi electrozi.

Idea principala a acestui proiect este sa obtina o rotatie a topiturii intr-un creuzet rectangular folosind o configuratie speciala de camp electromagnetic. Creuzetul cu topitura de siliciu se plaseaza intr-un camp magnetic vertical si un camp electric este lasat sa treaca prin topitura cu ajutorul a 2 sau mai multi electrozi. In figura 1 sunt prezentate doua astfel de configuratii (una cu 2 si una cu 4 electrozi)

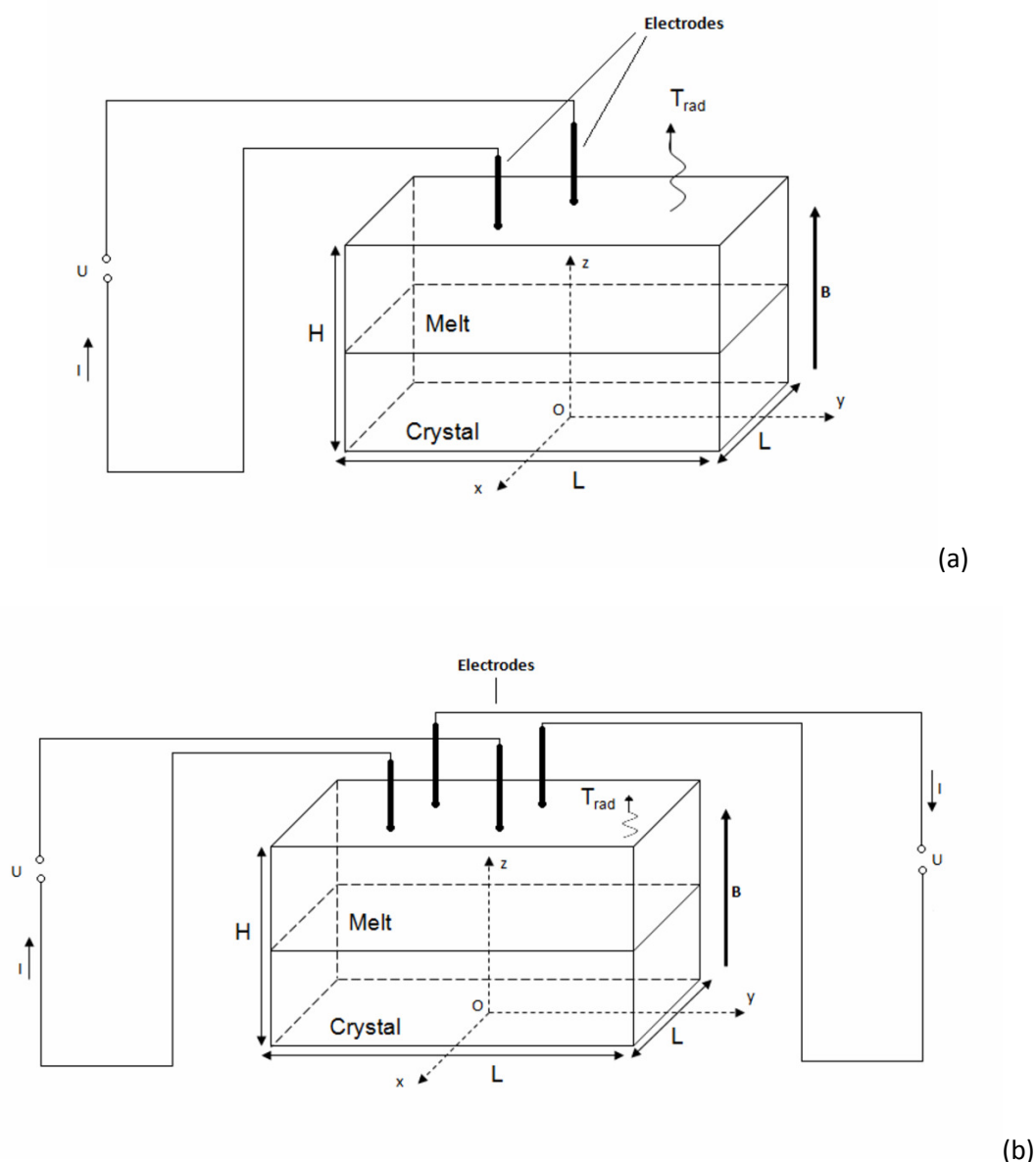


Figura 1. Configuratii de camp electromagnetic ce urmeaza a fi investigate.

Curgerea topiturii este descrisa de ecuatiile Navier-Stokes si reflecta conservarea masei, impulsului si caldurii pentru cazul 3-dimensional. In plus se considera aproximatia Boussinesq pentru curgerea naturala ( $\vec{f}_g = \rho(T_{ref})\vec{g}\beta(T - T_{ref})$ ) si densitatea de forta Lorentz ( $\vec{f}_L = \vec{j} \times \vec{B}$ ) pentru actiunea campului magnetic:

$$\nabla \vec{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} - \mu \nabla^2 \vec{u} = -\nabla p - \vec{f}_g + \vec{f}_L \quad (2)$$

$$\rho C_p \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) T \right] - k \nabla^2 T = 0 \quad (3)$$

Unde  $\rho$  este densitatea,  $T_{ref}$  este temperatura de referinta,  $\vec{g}$  este acceleratia gravitationala,  $\beta$  este coeficientul de expansiune termica,  $\vec{j}$  este densitatea de curent electric,  $\vec{B}$  este inductia magnetica,  $\vec{u}$  este viteza topiturii,  $C_p$  este capacitatea calorica si  $k$  este conductivitatea termica.

Vitezele fluidului de-a lungul frontierelor corespunzătoare creuzetului și cristalului sunt fixate la  $\vec{v} = 0$ . De-a lungul suprafeței topiturii este impusa condiția de “suprafata libera”. Temperaturile de-a lungul peretelui vertical lateral și la bază sunt fixate. La suprafața liberă s-a aplicat un schimb radiativ cu temperatura ambientală de  $T_{rad} = 1713K$ .

La interfața lichid-solid se consideră generarea de căldură latentă pentru viteza de cristalizare considerată:

$$k_s \nabla T|_s - k_L \nabla T|_L = u_g \rho_s \Delta H \quad (4)$$

unde  $k_s$  și  $k_L$  reprezintă conductivitățile termice din solid și lichid,  $u_g$  este viteza de creștere setată la 10 mm/h pentru simulările noastre și  $\Delta H$  este căldura latentă.

Pentru calculul fortei Lorentz s-a introdus densitatea de curent indusa in topitura de campul magnetic stationar B:

$$\vec{j} = \sigma (-\nabla \phi + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (5)$$

In ecuatia (5)  $\sigma$  este conductivitatea electrica si  $\Phi$  este potentialul scalar obtinut in urma rezolvarii ecuatiei:

$$\Delta \phi = \nabla (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (6)$$

Cu

$$\nabla \vec{j} = 0, \quad (7)$$

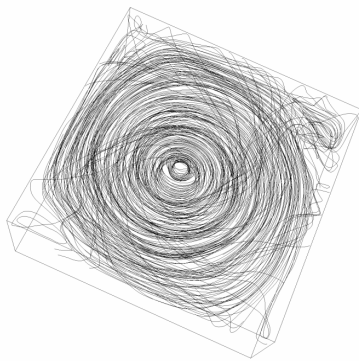
Pentru a genera un curent electric in topitura doua situatii au fost considerate: in primul rand, asa cum se vede din figura 1a, curentul electric patrunde in topitura prin doi electrozi plasati la suprafata topiturii si conectati la o sursa continua de tensiune. In al doilea scenariu, doua perechi de electrozi sunt folositi asa

cum se vede in figura 1.b. Electrozii se considera avand un diametru mic, astfel efectul lor asupra campului vitezelor si temperaturii se poate neglija.

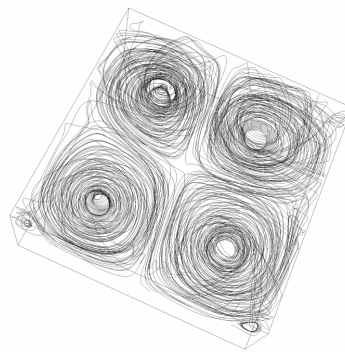
Programul STHAMAS3D a fost dezvoltat astfel incat sa permita rezolvarea numerica a modelului matematic de mai sus. In principal a fost dezvoltata o subrutina care sa ia in considerare conditiile pe frontiera datorate prezentei electrozilor.

Au fost realizate doua rulari test:

- una pentru configuratia cu 2 electrozi Fig.2.a, campul magnetic fiind 10 mT si curentul electric 10A
- una pentru configuratia cu 2 electrozi, Fig.2.b, campul magnetic fiind 10 mT si curentul electric 2A



(a)



(b)

Activitatea 2.1 Proiectarea si constructia bobinei pentru generarea campului magnetic.

Se observa ca in urma aplicarii campului electromagnetic, rezulta o rotatie a topiturii, caracterizata de o singura celula de convecție in cazul a 2 electrozi si 4 celule de convecție in cazul a 4 electrozi. In etapele urmatoare va fi urmarit modul in care campul magnetic si electric influenteaza convecția topiturii in creuzet.

### Activitatea 2.1 Proiectarea si constructia bobinei pentru generarea campului magnetic

*Tema tehnica.* Generarea unui camp magnetic unidirectional si uniform in interiorul unui volum de aer de dimensiune 70×70×70 cm. Se cere ca inductia campului magnetic  $B$  sa fie reglata cu mijloace externe in intervalul 0...0.35 T.

*Prezentarea generala a solutiei.* Solutia tehnica propusa consta in realizarea unui electromagnet alimentat in curent continuu in forma literei “C”, cu miez feromagnetic (fig. 1). Volumul de referinta precizat in tema tehnica joaca rol de intrefier. Deoarece campul magnetic solicitat nu este alternativ sau rotitor, nu vor exista pierderi prin curenti Foucault si ca urmare miezul feromagnetic poate fi realizat din otel masiv. Circuitul

magnetic creat (miez + intrefier) va fi excitat de o infasurare electrica de curent continuu, dimensionata astfel incat inductia magnetica in volumul de referinta sa poata atinge valoarea  $B = 0.35\text{T}$ .

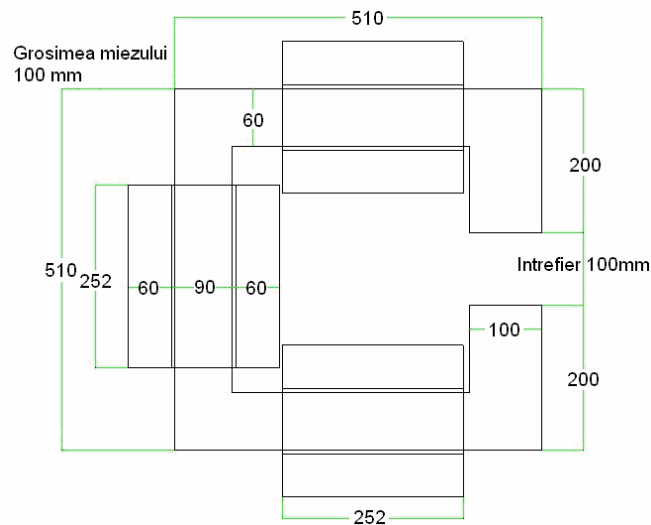


Fig. 1. Schita reprezentand o sectiune transversala a electromagnetului

Avand in vedere deformarea liniilor de camp in zona intrefierului volumul acestuia a fost prevazut mai mare, egal cu  $100 \times 100 \times 100\text{ mm}$ . Pentru a beneficia de un camp magnetic cat mai uniform, experimentele vor fi derulate in interiorul unui volum de  $70 \times 70 \times 70\text{ mm}$  din centrul intrefierului.

*Calculul simplificat al electromagnetului* [1]. Consideram un circuit magnetic serie format din miezului feromagnetic ( $Fe$ ) si intrefier ( $\delta$ ) si neglijam dispersia liniilor de camp. Aplicand legea circuitului magnetic, calculam solenatia necesara pentru a realiza in intrefier inductia magnetica  $B$  ( $N$  si  $I$  sunt curentul si, respectiv, numarul de spire din bobina):

$$\theta = NI = H_{Fe} l_{Fe} + \frac{B}{\mu_0} \delta \quad (1)$$

Din curba de magnetizare a otelului pentru  $B = 0.35\text{ T}$  citim  $H_{Fe} = 200\text{ A/m}$ ,  $l_{Fe} = 1.58\text{ m}$  si  $\delta = 0.1\text{ m}$ . Rezulta:

$$\theta = NI = 28168\text{ A} \times \text{spira} \quad (2)$$

Daca se considera o dispersie de 10% a liniilor de camp pe portiunile liniare lungi ale miezului si, la fel, o deformarea a liniilor de camp din intrefier la 10%, rezulta ca solenatia necesara pt. obtinerea inductiei  $B = 0.35\text{ T}$  va fi:

$$\theta_{ex} = 34000\text{ A} \times \text{spira} \quad (3)$$

*Calculul infasurarii.* Folosim 3 bobine distincte, identice, inseriate, fiecare dimensionata considerand sectiunea utila a miezului de  $80 \times 100$ . Prin urmare, sectiunea disponibila pentru bobinare este  $S_d = 250 \cdot 38 = 9500\text{ mm}^2$  / bobina. La un coeficient de umplere al bobinajului  $k_u = 0.65$ , rezulta ca fiecare bobina va putea prelua o sectiune utila de Cu de  $S_u = k_u S_d = 6175\text{ mm}^2$ . Pentru o densitate de curent  $j = 2\text{ A/mm}^2$ , solenatia

care poate fi asigurata prin inserierea celor 3 bobine va fi  $\theta = 3jS_u = 37050 \text{ A} \times \text{spira}$ . Daca optam pentru utilizarea unui conductor de Cu dublu emailat cu diametrul  $d = 1.2 \text{ mm}$ ,  $S_c = 1.131 \text{ mm}^2$ , rezistenta electrica specifica  $R_s = 15.36 \text{ } \Omega/\text{km}$ , atunci fiecare bobina va contine un numar de spire  $N_{bob} = S_u / S_c = 5460$  spire/bobina, iar numarul total de spire va fi  $N = 16380$  spire. Curentul nominal prin infasurare va fi  $I = 2.26 \text{ A}$ .

Lungimea medie a unei spire va fi  $l_{sp} = 0.6 \text{ m}$ , de unde rezulta ca lungimea totala a conductorului necesar pentru realizarea celor 3 bobine va fi  $L = 9.828 \text{ km}$ . Infasurarea va avea o rezistenta electrica totala  $R = 151 \text{ ohm}$ , care impune alimentarea acesteia de la o sursa de curent continuu cu tensiunea  $U = RI = 341 \text{ V}$  si cu puterea nominala de minim  $P = 771 \text{ W}$ .

Cele doua suprafete ale intrefierului se vor atrage reciproc cu forta  $F = B^2 \frac{A\delta}{\mu_0} = 975 \text{ N}$ .

*Verificarea proiectarii prin simularea campului din intrefier cu metoda elementului finit.* Pentru simulare a fost folosit pachetul software QuickField-Students [2]. Rezultatele confirma obtinerea valorii tinta  $B$  a inductiei magnetice in intrefier (Fig 2).

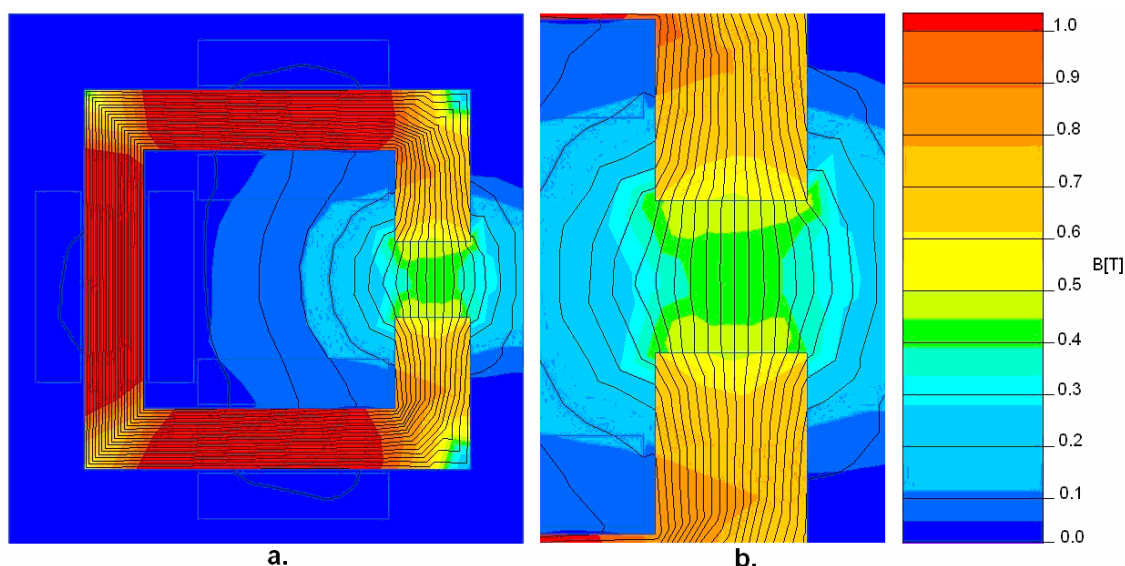


Fig. 2. (a) Configuratia camp magnetic in electromagnet; (b) Detaliu pentru intrefier

### Bibliografie

- [1] Mocanu CI (1981) Teoria Campului electromagnetic, Ed. Didactica si pedagogica, Bucuresti.
- [2] QuickField - Simulation Software for Electromagnetics, Heat Transfer and Stress Analysis.

<http://www.quickfield.com/>

Director proiect,