

Model indukcijske peči za taljenje aluminija

Darjan Gradišnik, Nenad Muškinja

ATES d.o.o., FERI Maribor

Mroževa ulica 21, 2310 Slovenska Bistrica, UM FERI, Koroška cesta 46, 2000 Maribor

darjan.gradisnik@ates.si, nenad.muskinja@um.si

Model of aluminum induction melting furnace.

IMPOL LLT has three different types of furnaces for which a universal model has been developed, which must cover at least two types:

- Line frequency furnace (50Hz), where capacitor stages are added as the inductance of the furnace decreases (due to the transition from solid to liquid phase) and
- SF furnace, where the decrease in inductance is compensated by an increase in frequency (between 60 to 100Hz).

Of course, it is necessary to ensure a comparable current density in the vessel to achieve process times similar to those in large furnaces.

The aim is to analyze the initial input, study the supply of adequate power, analyze the cooling energy, the efficiency and, of course, the possible shortening of the process.

Kratek pregled prispevka

V IMPOL LLT imajo trije različne tipe peči, za katere se je pripravil univerzalen model, ki mora pokrivati vsaj dva tipa:

- Peč linijske frekvence (50Hz), kjer se ob zmanjševanju induktivnosti peči (zaradi prehoda iz trdnega v tekočo fazo) dodajajo stopnje kondenzatorjev in
- SF peč, kjer se zmanjševanje induktivnosti kompenzira z dvigovanjem frekvence (med 60 do 100Hz).

Seveda je potrebno zagotoviti primerljivo tokovno gostoto v loncu, da dosežemo podobne čase procesa, kot so v velikih pečeh.

Namenil se je analizi začetnega vložka, študiji dovajanja ustrezne moči, analizi hladilne energije, izkoristku in seveda možnemu skrajševanju procesa.

1 Zakaj model

V realnih pečeh se za eksperimentiranje zelo težko odločimo, tudi zaradi možnosti 'zamrznitve' peči. Do tega lahko pride pri dodajanju večje mase, ki z odvzemanjem toplote tekoči fazi odvzame toliko energije, da se ta povrne v trdno fazo.

Sekundarni aluminij je v zelo različnih oblikah: ostužki, opilki, različno velike kosovne oblike, ki pa pomenijo tudi zelo različno gostoto materiala. Spomnimo se, da indukcijska peč z vrtničnimi tokovi segreva direktno material in ne zraka. Problem pri drobnem materialu je tudi, da prihaja do nenamernega sintranja. V kolikor večjo količino takega materiala dodamo nad tekočo frakcijo, se ustvari zapora, pod katero nastaja nova količina tekoče frakcije. Pri Al je specifična teža trdnega materiala $2,71 \text{ kg/dm}^3$, tekoč pa ima gostoto $2,4 \text{ kg/dm}^3$. To pomeni, da se v obratnem sorazmerju poveča tudi volumen materiala v razmerju $1 : 1,14$. Zaradi tega lahko v notranjosti nastanejo veliki tlaki, ki privedejo do nevarnega načina dela – material nad tekočo frakcijo hoče 'izstreliti' navzgor ali pa pritisk poškoduje konstrukcijo peči s širjenjem v prečni smeri.

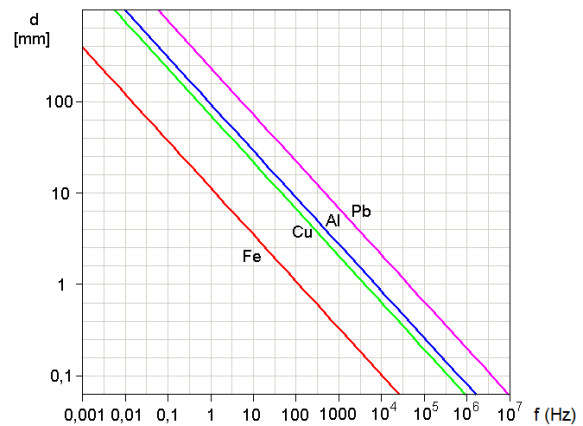
Zelo nevarni so tudi neosušeni materiali. To je lahko voda pa tudi ostanki mineralnih olj zaradi obdelave sekundarnega aluminija

Obstajajo empirična pravila kako zalagati peč, ki so nastala na osnovi daljšega obdobja. Z modelom in upoštevanjem fizike v talilnem loncu pa se bodo nekatera potrdila, nekatera ovrgla, nekatera pa se bodo postavila popolnoma na novo.

Doziranje moči je ročno – to pomeni, da je zelo odvisno od operaterja in njegovega občutka. Opazi se, da človeški faktor zelo uniformira pristop ne glede na stanje v peči. Energija za pokrivanje izgub v peči je sestavljena iz pokrivanja 2 delov – izgube v loncu, ki naraščajo s temperaturo in izgub preko gladilnega sistema, ki so odvisne od moči, dovedene v vodno hlajeno tuljavo. Iz tega sledi, da krajši postopek pomeni racionalizacijo, saj izgube pokrivamo manj časa.

2 Zasnova modela

Modeli na tržišču so večinoma VF (visoko frekvenčni), saj dvigovanje frekvence pomeni zmanjševanje volumna vgrajenih komponent. Pri majhnih volumnih to ni problem, pri večjih pa se srečamo s problemom t.i. vdorne globine, ki je prikazana na sliki 1:



Slika 1: Vdorna globina

Kaj je vdorna globina? Zaradi izrivanja nosilcev električnega toka iz središča tokovodnika kot posledica elektromagnetne sile prihaja do t.i. kožnega pojava (skin efekta), ko pri višanju frekvence tokovna gostota v vodniku ni več enakomerna kot pri enosmernem toku. Definirana je tako, da je to globina, ko tok pade na 37% vrednosti ($1/e$). Definirana je:

$$d = \sqrt{\frac{\rho}{\mu\mu_0 f}} \text{ [mm]} \quad (1)$$

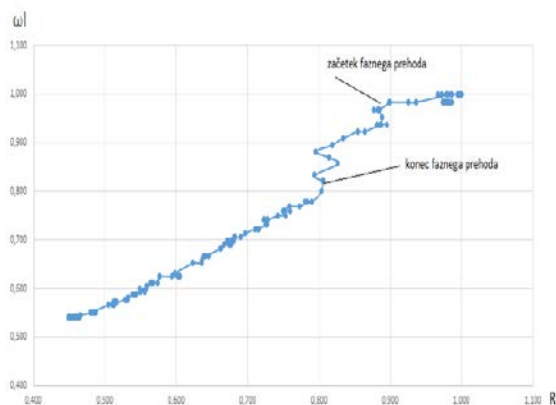
Zakaj je to tako pomemben faktor? Ker je snovno geometrijsko s tem določena tudi globina vrtničnih tokov, kjer z $I^2 \cdot R$ vnašamo energijo v material, ki bi ga radi raztalili. Visokofrekvenčne peči segrevajo površine (oziroma geometrijsko majhne kose), nižje frekvenčne pa segrevajo tudi v globino – kar pomeni direktni vnos energije v material, kar je najbolj zaželeno.

Tako nastajata dva modela – SF in VF. V SF modelu se bodo preučili vplivi različnih geometrij in struktur pri začetku procesa (sobna temperatura), v VF modelu pa se bo postavljalo močnostno karakteristiko, namenjeno skrajšanju

postopka (energijsko in okoljevarstveno izboljšanje).

Indukcijska peč je v bistvu transformator, ki ima na primarni strani N ovojev, na sekundarni pa enega, ki se mu nenehno spreminja presek, induktivnost in upornost v odvisnosti od volumna, temperature in agregatnega stanja.

Posnetek poteka peči JU1 v kompleksni ravnini je prikazan na sliki 2:



Slika 2: Potek impedance peči JU1 pri celotnem procesu

Iz slike 2 se vidijo tri faze:

- Segrevanje trdnega materiala
- Fazni prehod
- Segrevanje taline

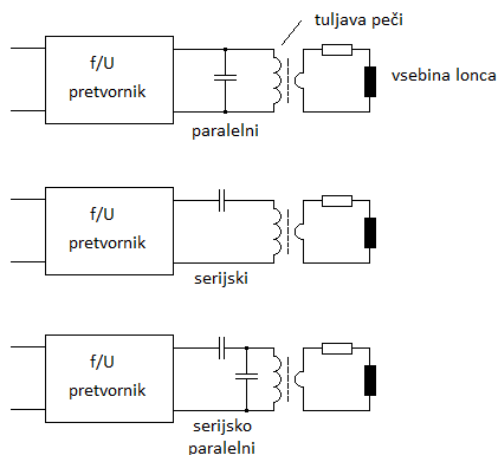
Seveda faze niso tako eksplicitno ločene, saj se proces začne tako, da najprej napolnimo peč z materialom, kjer dosežemo nekje med 30 do 40% mase končnega vložka. Material pa pogosto sega preko vplivnega področja tuljave, a se manjši del energije vseeno pretvori v dvig temperature.

3 Sestava modela

Model v pomanjšanem merilu ima za modeliranje začetka procesa generator v obliki frekvenčnega pretvornika (enofaznega), ki ima možnost spreminjanja tako frekvence kot napetosti ločeno. Za izvedbo procesa pa je uporabljen 2000W modul, kjer za spremembo moči poskrbimo z uporabo avtotransformatorja, ki napaja transformator usmerniškega modula.

Shematsko je prikazan na sliki 3. Za najugodnejši energijski vnos imamo peč povezano s kondenzatorsko enoto, da zagotovimo resonanco nihajnega kroga. Možnosti imamo več:

- Paralelni nihajni krog (Junker 1 in Junker 2)
- Serijsko paralelni nihajni krog (Junker 3 in 4)
- Serijski nihajni krog (Junker 5)



Slika 3: Trije pristopi generatorskega dela peči

Paralelni pristop je najstarejši, sedaj se največ uporablja serijski, imenovan tudi napetostni. Krmilje je izvedeno ponavadi z IGBT, deluje pa na višjih napetostnih nivojih.

Slabost starega paralelnega pristopa je ta, da se optimalno delovanje ob poružitvah materiala v peči odraži s hitrimi porasti tokov.

Bistveni sestavni del modela je tudi vodno hlajenje. V praksi je to demineralizirana voda, ki se ohlaja preko toplotnih izmenjevalcev. Za model pa se je pristopilo z zalogovnikom vode znane količine, kjer se na osnovi dviga temperature vode in njene mase izračuna toplota, potrebna za takšen dvig temperature ($c = 4196 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$):

$$W_{H_2O} = m * c * \int_{T_{zač}}^{T_{kon}} dT \quad (2)$$

4 Modifikacija pristopa

Zaradi male induktivnosti zračne tuljave (kar induksijska peč je, razen pri taljenju

feromagnetnih materialov) so potrebne velike kapacitivnosti, da se doseže resonanca. Primer: indukcijska peč kapacitete 3,2t za taljenje Al ima preko 51 mF (7 MVAR). Pri modelu smo uporabili malce modificiran pristop, ko se induktivnost priključi na sekundarni strani transformatorja, kapacitivnost pa na primarni strani. Impedanca se transformira s kvadratom prestave transformatorja.

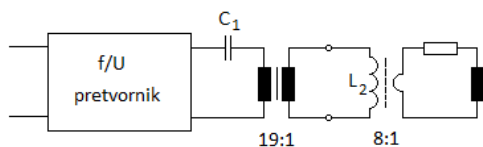
Izhajajmo iz enačbe:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2^2}} \quad (3)$$

Pri čemer sta L1 in C1 primarna, L2 in C2 pa sekundarna stran transformatorja. Dobimo enačbo za resonančno frekvenco:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{p^2 L_2 C_1}} \quad (4)$$

Tako dobimo naslednjo konfiguracijo vezave:

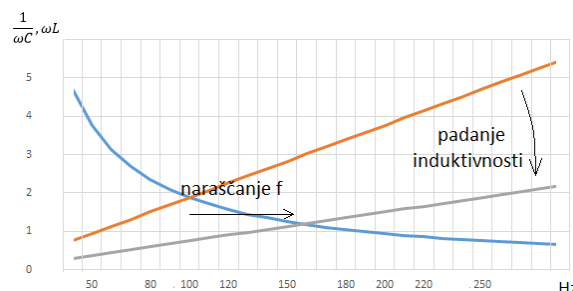


Slika 4: Modificirani nihajni krog s transformatorjem

Kapacitivnost na primarni strani je tako 361 x manjša, kot bi bila pri direktni vezavi brez transformatorja. To močno poenostavi izdelavo modela. Induktivnost vložka se med procesom zmanjšuje (razmerje cca 2 : 1). To nam določi tudi obseg spremembe frekvence, kar je prikazano na sliki 5. Zakaj odločitev za spremembo frekvence in ne kapacitivnosti? Iz 2 razlogov:

- Ni potrebe po vklopih velikih kapacitivnosti in posledično velikih prehodnih tokovih, ki jih zmanjšujemo z udarnimi dušilkami
- Magnetna sila s frekvenco upada in tako lahko delamo z večjo močjo in material ne 'nori'. Če ste kdaj videli delovanje lončaste indukcijske peči, poznate nastanek staljene skulpture, ki se dvigne in odlepi od sten peči. S tem velik del

energije pretvorimo v gibanje in je manj preostane za taljenje in segrevanje.



Slika 5: Delovno področje frekvenc pri konstantni vrednosti kapacitivnosti

5 Povzetek

V obeh modelih se bodo lahko preizkušale različne strategije saržiranja sekundarnega aluminija (vertikalna sestava materialov), močnostna časovna karakteristika (recept), polnilni faktorji, G-faktor (transformirana normirana upornost vložka). To je nujno, da se lahko v postopek vnese prehod iz operatorskega v delno avtonomni proces. Taljenje materialov v indukcijski peči je še vedno proces, ki je v veliki meri odvisen od operaterjev, najboljše prakse pa se bo poskusilo prevesti v avtomatizacijo.

6 Literatura

- [1] Nadot, Vladimir V. (Sicklerville, NJ, US)
 Belsh, Joseph T. (Mount Laurel, NJ, US)
 Cao, Mike Maochang (Westampton, NJ, US)
 Fishman, Oleg S. (Maple Glen, PA, US), Induction furnace with improved efficiency coil system, Inductherm Furnace Group, Rancocas, 2002