DOI: 10.2478/bhee-2013-0010

TEMPERATURNO POLJE TOPIONIČKOG AGREGATA

THE TEMPERATURE FIELD METALLURGY FURNACE

Enes Džihić[1], Vlado Madžarević[2]

Sažetak: Primjenom savremenih programskih alata MATLAB, MAGMASOFT kao i numeričkim proračunom temperaturnog polja ovim radom se pokazalo da se može dobiti vjerodostojna slika temperaturnog polja topiničkog agregata. Proračun je vršen 2D i 3D metodom konačnih elemenata u stacionarnom režimu. Za primjer proračuna i analize uzet je topionički agregat – „peć sa plivajućom troskom", koja služi za proizvodnju visokokvalitetnih čelika. Proračunom dobijena slika za temperaturno polje omogućuva pravljenje različitih analiza temperaturnog opterećenja svih elemenata peći. To dalje znači, da je moguće optimalno konstruisanje peći u cilju poboljšanja njenih energetskih karakteristika u svrhu postizanja najekonomičnijeg rada. Ustanovljeno je da je kristalizator peći sa plivajućom troskom izložen najvećim temperaturnim opterećenjima, tako da je ovom konstrukcionom elementu peći potrebno posvetiti pažnju s aspekta njegove konstrukcije i organizacije hlađenja. Sličan metodološki pristup može se primijeniti i za druge topioničke agregate i vršiti kvalitetna analiza.

Ključne riječi: peć sa plivajućom troskom, numerički proračun, metoda konačnih elemenata, temperaturno polje, kristalizator.

Abstract: Applying the contemporary MATLAB, MAGMASOFT software package, together with a numerical calculation temperature field, this paper shows a real image of thermal field in metallurgy furnace. The 2D and 3D methods of finite elements in static regime have been applied in the calculation. As an example of calculation, a specific "furnace with floating slag" was taken as a source for production of high-quality steel. The image obtained by calculation enables the analysis of temperature loadings for all elements of the furnace. This gathers the optimal furnace constructions with the goal of enhancing the energetic work indicators of the furnace in purpose of the most economical work. It has also established that the crystallizer of furnace with floating slag requires attention to be paid to it from the aspect of its construction and cooling setting. Similar methodological approach can be applied for other metallurgy furnaces, along with implementation of quality analysis.

Keywords: furnace with floating slag, numerical calculation, method of finite elements, temperature field, crystallizer.

UVOD

Proizvodnja visokokvalitetnog čelika je u stalnom porastu zbog toga što se radi o veoma traženom proizvodu na svjetskom tržištu. Osnovni topionički agregat (u nekoliko verzija) za proizvodnju visokokvalitetnog čelika je svakako peć sa plivajućom troskom. Ona je relativno jednostavne izvedbe, a sastoji se od vodeno hlađenog bakarnog kristalizatora i elektroda, koje su od metala koji se topi. Elektroda se dobija prethodnim odlijevanjem ili presovanjem metalnih otpadaka ili isitnjene rude. Elektroda koja se topi vezana je na jedan kraj sekundarnog transformatora koji snižava napon, a korito peći je vezano na drugi kraj sekundara. U procesu topljenja vrh elektrode se zagrijava do temperature topljenja. Kapljice istopljenog metala kao teže, padaju kroz trosku, formirajući tečno kupatilo na kome troska pliva. S obzirom da je troska slab električni vodič, mnogostruko lošiji od ostalih dijelova formiranog električnog kola, u njoj će prirast temperature biti najveći uslijed čega će se elektroda topiti. Prolaskom tečnog metala kroz trosku dolazi do odstranjivanja neželjenih elemenata i metal se u donjem dijelu kristalizira, počinje očvršćavati i formira zahtijevani oblik i sastav ingota. U peći sa plivajućom troskom odvijaju se različiti procesi kao što su: termički, hemijski, mehanički, elektromagnetski i drugi, i svi su oni direktno ili indirektno ovisni o temperaturnom polju. Stoga je opravdan interes za stalnim usavršavanjem proračuna temperaturnog polja.

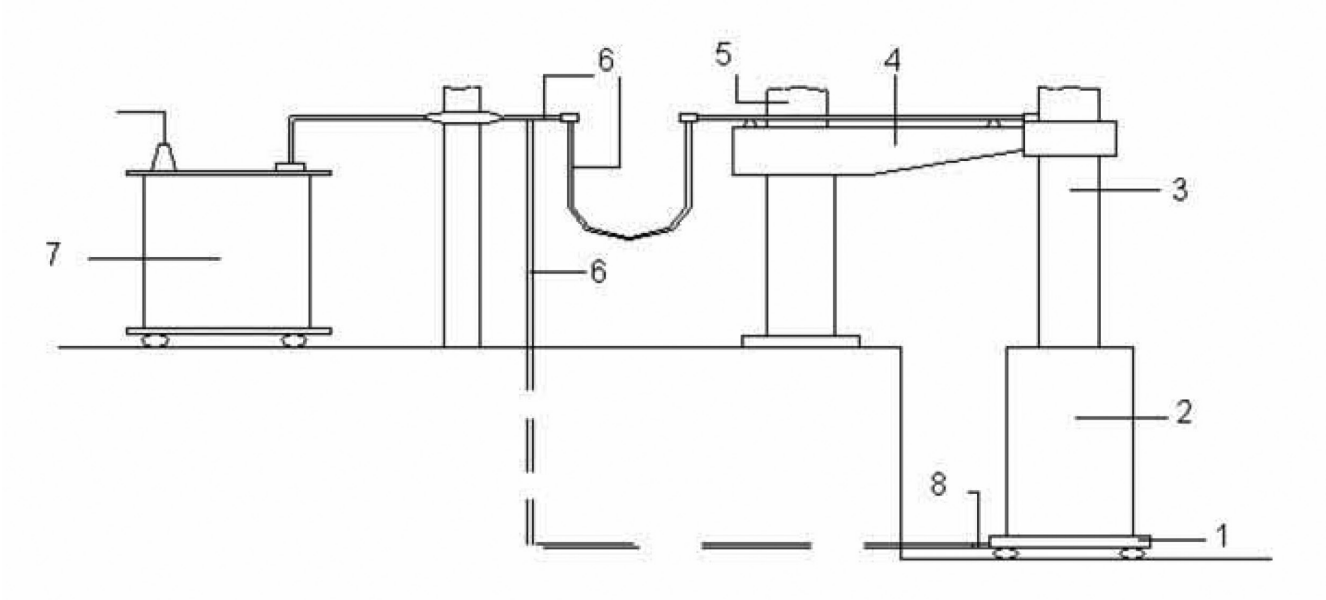
Cilj ovog rada je definiranje numeričkog proračuna raspodjele trodimenzionalnih temperaturnih polja i analiza temperaturnih opterećenja pri elektrotopioničkom procesu peći sa plivajućom troskom.

1. INSTALACIJA PEĆI I NJENE ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE

Na Slici 1 prikazana je dispozicija opreme električne instalacije peći sa plivajućom troskom.

Napajanje peći je ostvareno preko "pećnog" transformatora 7, čiji se sekundarni napon može regulisati u širo-

[1] JP BH Pošta, Bosna i Hercegovina
[2] Fakultet elektrotehnike, Univerzitet u Tuzla, Bosna i Hercegovina
enes.dzihic@posta.ba; vlado.madzarevic@untz.ba
Rad dostavljen: juni 2012. Rad prihvaćen: januar 2013.



Slika 1: Dispozicija opreme električne instalacije peći

kim granicama. Sekundarni vod 6 se sastoji od šinskog razvoda i savitljivih vodiča, pri čemu se povratni vodič preko nožastog kontakta vodi na pod peći 1. U strujnom krugu bitni elementi su elektrode 3 i 5, koje su fiksirane držačem 4. Sa Slike 1 može se vidjeti da strujno kolo, koje je priključeno na sekundar transformatora predstavlja veliku petlju s njegovim velikim induktivitetom, odnosno s relativno niskim faktorom snage. U novijim konstrukcijama koriste se dva postupka snižavanja induktiviteta spojnih vodiča. Prvi način je primjena bifilarnog spojnog vodiča na pećima s dvije elektrode, a drugi način je snižavanje učestalosti napona napajanja na vrijednosti 2-10 Hz, korištenjem pretvarača frekvencije.

Kako su toplinski gubici u kristalizatoru veliki, stepen iskorištenja je nizak. Specifični utrošak električne energije peći kreće se u granicama od 1000-1200 kWh/toni.

Poboljšavanjem (racionalizacijom) sheme napajanja peći moguće je značajno sniziti reaktivne gubitke (čak i do 50%). Dakako, time nisu iscrpljene sve mogućnosti u snižavanju specifične potrošnje električne energije putem poboljšanja električnih karakteristika, nego se teži i poboljšanju termofizičkih karakteristika agregata.

U te mogućnosti prije svih spada poboljšanje sistema hlađenja kristalizatora i drugih dijelova peći sa plivajućom troskom.

2. MATEMATIČKI MODEL PRORAČUNA TEMPERATURNOG POLJA TOPIONIČKOG AGREGATA

Za proračun temperaturnog polja u stacionarnom režimu metodom konačnih elemenata korišten je program MAGMASOFT, a proračun temperaturnog polja vršen je za poprečni presjek peći sa plivajućom troskom.

Presjek peći sa plivajućom troskom, koja je predmet numeričkog proračuna, prikazan je na Slici 2.

Osnovni podaci peći sa plivajućom troskom dati su u nastavku teksta:

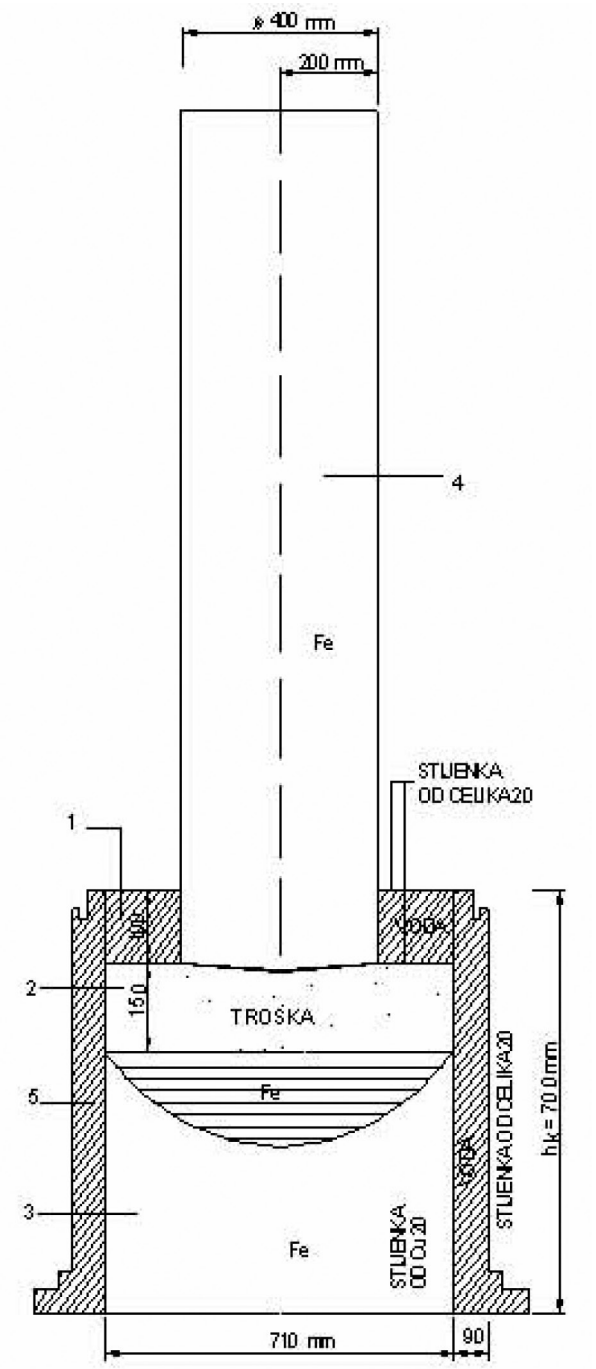
– snaga	S = 800 kVA
– jačina struje	I = 14,5 kA
– napon	U = 80 V
– faktor snage	cos ϕ = 0,8
– vrijeme grijanja	t = 20 min
– brzina pretapanja	A = 620 kg/h
– količina rashladne vode	770 l/min
– vrsta troske	CaFe3
– količina troske	100 kg
– koeficijent prijenosa topline provođenjem željeza	λ_{Fe} = 50 W/m°C
– koeficijent prijenosa topline provođenjem bakra	λ_{Cu} = 348 W/m°C
– koeficijent prijenosa topline provođenjem troske	$\lambda_{š}$ = 98 W/m°C
– koeficijent prijenosa topline provođenjem šamota	$\lambda_{št}$ = 0,296 W/m°C
– koeficijent prijenosa topline provođenjem zraka	λ_{e} = 0,0248 W/m°C
– prečnik elektrode	d_e = 400 mm
– prečnik kristalizatora	d_k = 710 mm

Kako bi se riješile diferencijalne jednačine, koje opisuju raspodjelu polja, treba uzeti u obzir slijedeća pojednostavljenja koja bitno ne utječu na rezultate, a omogućavaju njihovo rješavanje i to:

a) vršen je 3D proračun polja obzirom da je peć cilindričnog oblika, a slika temperaturnog polja je osno simetrična,

b) kupka od rastopljenog metala uzeta je u obliku kalote lopte s temperaturom jednakoj temperaturi istopljenog metala po cijeloj zapremini,

c) mediji s različitim koeficijentima prijenosa topline provođenjem tretiraju se da su homogeni,



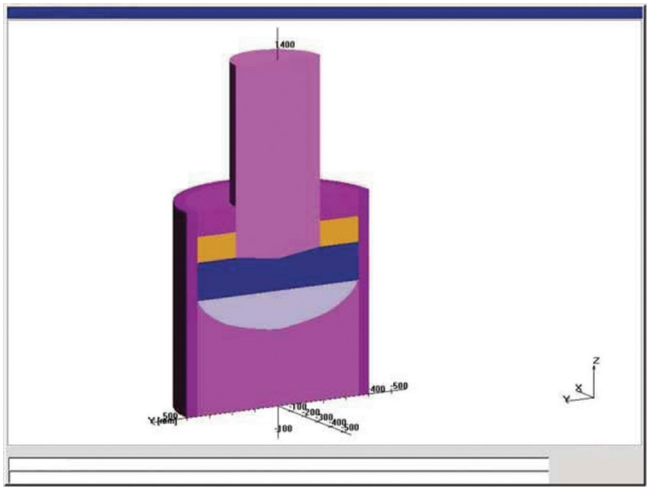
Slika 2: Presjek peći sa plivajućom troskom

d) temperatura vode za hlađenje u kristalizatoru je 30°C po čitavoj površini kristalizatora,
e) temperatura vode u vodom hlađenom poklopcu je 30°C,
f) prijenos topline s tečne kupke na vodu za hlađenje, kroz pojedine dijelove peći, vrši se stacionarno provođenjem.

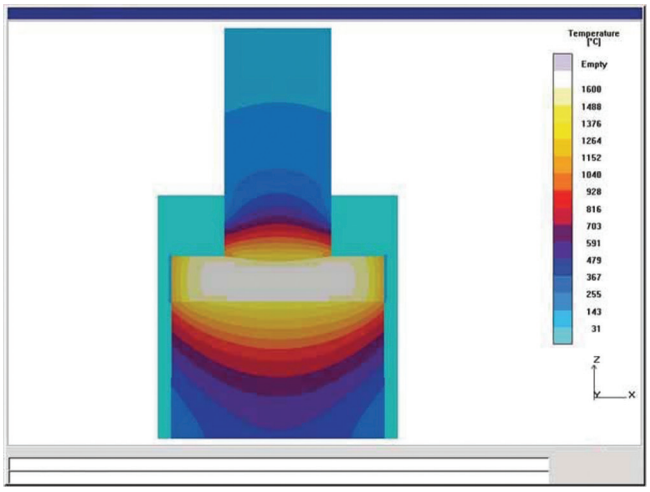
Uvjeti b), c) i d) predstavljaju granične uvjete koji su potrebni za proračun.

Stacionarni prijenos topline (uvjet f)) opisuje se Furierovim zakonom, čime je omogućeno korištenje analogije između stacionarnog temperaturnog polja i statičkog električnog polja koja je potrebna za proračun.

Na Slikama 3 i 4 prikazana su temperaturna polja za različite faze topljenja, odnosno visinu uronuća.



Slika 3: Peć prije početka topllenja



Slika 4: Temperaturno polje 2D u jednoj fazi topljenja

Diferencijalna jednačina koja definira procese raspodjele temperaturnog polja data je na slijedećoj jednačini [1], [2]:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{c_p \rho}\left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2}\right) \quad (1)$$

Za rješenje date diferencijalne jednačine neophodno je postaviti početne uvjete koji definiraju temperaturno polje u početnom trenutku i granične uvjete koji određuju uzajamno djelovanje između površine tijela i medija u kojem se tijelo nalazi.

Kao početni uvjet najčešće se uzima da je temperatura svih tačaka sistema u početnom trenutku jednaka temperaturi okoline Θ_a :

$$\Theta_{t=0}(x, y, z, t) = \Theta_a = f(x, y, z) \quad (2)$$

Za tačke $(x^\bullet, y^\bullet, z^\bullet)$ granice C, oblasti V, granični uvjeti se mogu svesti na:

– granični uvjet prve vrste, kada se zadaje vremenska raspodjela temperature na površini tijela:

$$\Theta(x^{\bullet}, y^{\bullet}, z^{\bullet}, t) = f(x^{\bullet}, y^{\bullet}, z^{\bullet}, t) \quad (3)$$

– granični uvjet druge vrste, kada se u svakoj tački površine tijela zadaje vremenska funkcija raspodjele:

$$P_g\ (x^{\bullet}, y^{\bullet}, z^{\bullet}, t) = -\lambda(\Theta)\frac{\partial\Theta}{\partial n} \quad (4)$$

gdje je $\frac{\partial\Theta}{\partial n}$ – temperaturni gradijent na površini;

– granični uvjet treće vrste definira funkcionalnu ovisnost prijenosa topline sa površine tijela na okolni medij:

$$\alpha\left[\Theta_a(x^{\bullet}, y^{\bullet}, z^{\bullet}, t) - \Theta(x^{\bullet}, y^{\bullet}, z^{\bullet}, t)\right] = -\lambda(\Theta)\frac{\partial\Theta}{\partial n}; \quad (5)$$

– granični uvjet četvrte vrste, koji karakterizira razmjenu topline na granici između dva različita medija:

$$\lambda_1(\Theta_1)\frac{\partial\Theta_1}{\partial n} = \lambda_2(\Theta_2)\frac{\partial\Theta_2}{\partial n} \quad (6)$$

pri

$$\Theta_1(x^{\bullet}, y^{\bullet}, z^{\bullet}, t) = \Theta_2(x^{\bullet}, y^{\bullet}, z^{\bullet}, t) \quad (7)$$

Na granične uvjete prethodnih jednačina utječu i karakteristike (hemijski sastav, stepen istopljenosti...) plivajuće troske.

Analitički je moguće naći neka partikularna rješenja jednačine (1), uz određena pojednostavljenja [3], [4], [5]. Međutim, rješenja se danas za većinu praktičnih problema dobijaju s velikom tačnošću, korištenjem digitalnih i analognih modela.

3. ANALIZA REZULTATA NUMERIČKOG PRORAČUNA TEMPERATURNOG POLJA

U peći sa plivajućom troskom, za koju je vršen proračun temperaturnog polja, prijenos topline se u osnovi odvija provođenjem, pri čemu njeni elementi ne mijenjaju svoj položaj u prostoru. Razmatrani problem raspodjele temperature stacionarnog termičkog procesa opisanog Fourierovom jednačinom (1) za provođenje toplote je analogan problemu proračuna raspodjele elektrostatičkog polja, odnosno raspodjele električnog potencijala naelektrisane provodne polulopte okružene homogenim dielektricima različitih dielektričnih konstanti i iste geometrije kao i kod peći sa plivajućom troskom.

Kristalizator peći je jedan od najvažnijih dijelova peći sa plivajućom troskom. Zavisno od zahtijevanog ingota odnosno odlivka, postoje kristalizatori različitog oblika i dimenzija: dugi stacionarni i kratki pokretni, visokog i normalnog pritiska, s prinudnim i prirodnim hlađenjem, bakarni, brončani i čelični, kompaktni i sklopivi. Funkcija kristalizatora je da preuzima ogromni toplotni fluks i da obezbijedi dobijanje zahtijevanog ingota.

Plivajuća troska ima funkciju odstranjivanja neželjenih primjesa i plinova iz pretopljenog metala.

Slike temperaturnih polja po presjeku peći, koje su date na Slikama 3 i 4 omogućuju slijedeće analize:

- temperaturnih naprezanja pojedinih dijelova peći, a posebno kristalizatora peći, koji je koji je važan s aspekta stabilnosti peći,
- toplotnih gubitaka,
- utjecaja raspodjele temperature na kvalitetu odlivaka, odnosno ingota,
- utjecaja raspodjele temperature na dužinu odvijanja procesa, a samim tim i na stepen korisnog djelovanja.

Za vrijeme procesa topljenja, kristalizator peći sa plivajućom troskom podnosi ekstremno visoka neravnomjerna temperaturna opterećenja. Na Slici 5 dat je dijagram promjene temperature po visini peći, s unutarnje strane kristalizatora kao i po osi peći.

Praktično, kao kod svih topioničkih agregata, budući da se radi o izuzetno visokim temperaturama, dolazi do vrlo velikih naprezanja pojedinih elemenata ili pojedinih mjesta na njima.

Sa slika je uočljivo slijedeće:

- temperaturna naprezanja kade peći najveća su na mjestima dodira istopljenog čelika s kadom peći, u oba slučaja;
- utjecaj snižavanja temperaturnog naprezanja je više izražen kako se proces topljenja privodi kraju.

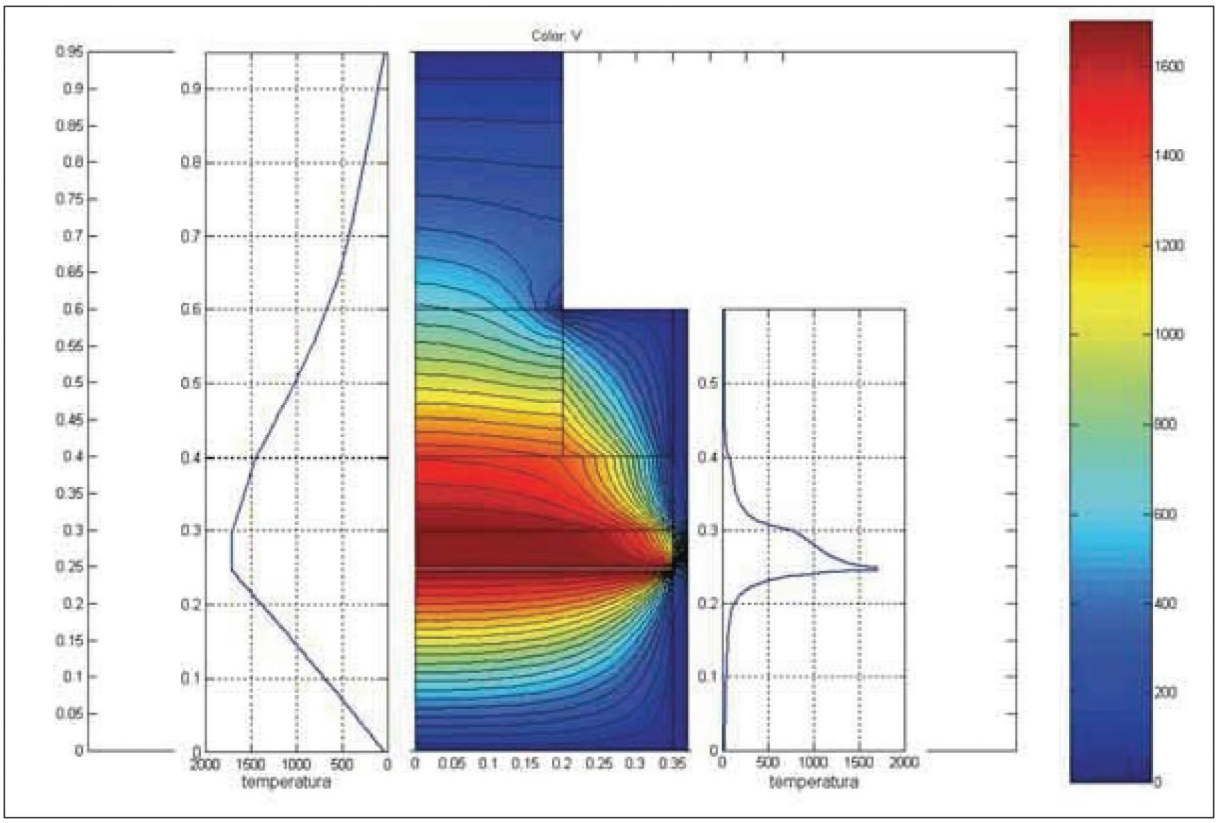
Zbog protjecanja struje uslijed Jouleovih gubitaka, toplina se razvija u svim elementima električnog kola. Toplina za proces pretapanja kroz trosku se razvija uslijed Jouleovih gubitaka u dijelu plivajuće troske ispod elektrode, koja ima najveći specifični električni otpor.

Električna energija pretvorena u toplinu u elektrodi koja se pretapa i plivajućoj trosci predstavlja korisnu energiju, dok električna energija pretvorena u toplinu u drugim dijelovima serijskog električnog kola predstavlja gubitke električne energije.

Ukupna električna energija utrošena u toku vremena topljenja raspodjeljuje se na: akumuliranu energiju u elektrodi povećavajući njenu unutarnju energiju odnosno temperaturu do tačke topljenja; na pokrivanje toplinskih gubitaka koji se javljaju uslijed prijenosa topline od zagrijane elektrode na medij u koji je uronjena i na promjenu unutarnje energije već pretopljenog ingota zbog protjecanja struje kroz ingot i razvijanja Jouleovih gubitaka.

Najveći toplinski fluks kroz kristalizator je na mjestu dodira istopljenog čelika sa zidom kristalizatora.

Međutim, ne znači da su i gubici električne energije veći zbog toga što se najveći dio toplinskog fluksa održava na



Slika 5: Raspodjela temperature sa unutarnje strane kristalizatora i po osi peći

račun smanjenja unutarnje energije tečne kupke i ingota, odnosno hlađenja u kristalizatoru. Prema tome, intenzivnijim hlađenjem kristalizatora smanjilo bi se termičko naprezanje kristalizatora, smanjio bi se utrošak električne energije za nepotrebno zagrijavanje ingota i skratilo bi se vrijeme topljenja. Sve pomenuto utječe na povećanje proizvodnje i produktivnosti peći.

Kvalitativna ocjena toplinskog bilansa je pokazala da je u ovom elektrotermičkom procesu korisno utrošena toplina, toplina koja dolazi u ingot, tj. prolazi kroz granicu razdvajanja faza troska – metal. Sve ostalo predstavlja gubitke.

Provedena mjerenja su pokazala da se veći dio topline koji se izdvaja u kupki sa troskom odvodi rashladnom vodom neposredno od tečne troske, kroz stijenke kristalizatora. Zračenje s površine kupke sa troskom iznosi znatan dio toplotnog bilansa, koji se mijenja u granicama od 12% do 28 %. Koeficijent popunjenosti kristalizatora također ima bitan utjecaj na korisnu količinu topline, tj. toplinu koja se koristi na zagrijavanje i topljenje metala elektroda. Ustanovljeno je da se veličine komponenti toplinskog bilansa elektrotermičkog postupka i njihov odnos mijenjaju u širokim granicama, u zavisnosti od tehnoloških i konstrukcionih faktora kao što su količina dodataka, geometrija topioničkog prostora, električni režim, itd.

4. ZAKLJUČAK

Primjenom numeričkih metoda za rješavanje parcijalne diferencijalne jednačine (1) uz date početne i granične uvjete može se napraviti kompleksna analiza složenih elektrotermičkih procesa u topioničkom agregatu. Savremenim pristupom analizi temperaturnog polja, korištenjem analogije električnih i toplinskih procesa, uz primjenu savremenih programskih alata, te matematičkim modeliranjem toplinskih procesa, omogućen je uvid u stacionarne procese u peći, kao i njihovu analizu.

Analizom numeričkog proračuna stacionarnog temperaturnog polja je omogućeno:

- lociranje mjesta maksimalnih temperaturnih naprezanja elemenata peći u toku topljenja,
- utjecaj na broj ciklusa topljenja koje mogu izdržati najizloženiji elementi temperaturnim naprezanjima bez oštećenja,
- proračun toplinskog fluksa u procesu topljenja,
- poboljšanje energetskih pokazatelja rada peći,
- poboljšanje konstrukcije peći za ekonomičniji rad.

Izvjesno je da se smanjenje gubitaka može izvršiti i racionalizacijom šeme napajanja.

Također, doslijedno vođenje elektrotopioničkog procesa prema istraživanjima u ovom radu dovodi do potpune optimizacije rada peći sa plivajućom troskom.

LITERATURA

[1] E. Hot: Elektrotermička konverzija energije, Sarajevo, 1985.

[2] R. T. Bui, D. Kocaefe: Mathematical modelling of the metal flow in sidewell furnaces, Cast shop Technology, Fundamentals and Modelling, Bonn, Germany, 1997.

[3] I. Kapetanović: Primjena numeričkog modelovanja trodimenzionalnih konačnih elemenata pri projektovanju elektrotehničkih uređaja, Doktorska disertacija, Tuzla 1989.

[4] V. S. Taranakov, V. K. Leko, O. V. Mazurov: Some problems of precise measurements of heat transfer coef- ficients in glass melts, Measurements of effective conductivity, Glastechnische Berichte, 1995.

[5] T. Wriedt: The Generalized Multipole Technique for Electromagnetic and Light Scattering, Elsevier, 1999.

BIOGRAFIJA

Enes Džihić *rođen je 5.10.1961. god. u Kozarcu opština Prijedor, gdje je završio osnovnu i srednju elektrotehničku školu. Elektrotehnički fakultet u Sarajevu (smjer Elektroprivreda) završio je 1987. godine. Magistrirao je na Fakultetu za elekrotehniku Tuzla 2003. godine. Od 1987.- 1996. god. bio je zaposlen u Energoinvestu – Tvornica sekundarne opreme gdje se bavio razvojem, projektiranjem i proizvodnjom sistema zaštite i komandovanja elektroenergetskih postrojenja. Od 1996.- 2001. god. bio je zaposlen u Željezari "Ilijaš" u Ilijašu kao glavni inženjer, a od 1997. god. i kao generalni direktor,. gdje je aktivno učestvovao u pokretanju proizvodnje. Od 2001. – 2002. god. bio je zaposlen u Vladi Kantona Sarajevo, u Ministarstvu prostornog uređenja i zaštite okoliša kao stručni saradnik za elektroenergetiku. Od 2002. god. zaposlen je u JP BH Pošta, Sarajevo – Sektor za razvoj i informacione sisteme.*

Vlado Madžarević *rođen je 9. septembra 1953. godine u Tuzli, Bosna i Hercegovina. Magistrirao je 1987. godine i doktorirao 1998. godine na Fakultetu elektrotehnike Univerziteta u Tuzli. Na Univerzitetu u Brnu, Republika Češka, na specijalističkom studiju, boravio je 1989. godine, gdje je specijalizirao iz oblasti analiza elektromagnetskih polja kod sinhronih mašina. Trenutno radi kao redovni profesor na Fakultetu elektrotehnike Univerziteta u Tuzli, na predmetima vezanim za teoriju elektromagnetskih polja, dijagnostiku električnih mašina, EMC. Bio je uključen u veći broj domaćih i međunarodnih projekata. Autor i koautor je velikog broja radova i knjiga.*