

Električni lok v obločni peči

Bratina Janez, Železarna Ravne

Elektroenergetske in toplotnotehniške karakteristike močnostnega električnega loka v trifazni obločni peči določajo tako konstrukcijo obločne peči kot njeno obratovanje v posameznih tehnoloških fazah proizvodnje jekla. Transformatorska prilagoditev zahtevam moči loka in njegovega stabilnega gorenja je le prvi od številnih vplivnih parametrov loka; elektrotehniške veličine obločne peči kot napetost (U_t), tok (J), fazni faktor $\cos \varphi$, kratkostične (X_k , R_k) in obratovalne (X_o) upornosti peči so tesno povezane s fizikalnimi lastnostmi izmeničnega loka; dolžina loka (L_l), ki ga označujejo impedančna upornost loka (Z_l), faktor loka (θ) in njegova specifična moč (q) so parametri, ki so v neposredni povezavi z gradnjo in obratovanjem modernih močnostnih obločnih peči; erozijski faktor ER in njegova relativna vrednost Er omogočata tako dimenzioniranje in optimiranje gradnje obločnih peči kot njihovo vodenje; razmernostni faktor virtualne induktivne upornosti loka nasproti njegovi nadomestni ohmski upornosti (δ) ter ustrezno razmerje kratkostičnih upornosti peči (γ) pa omogočata modeliranje vseh obratovalnih energetske in toplotne stanj obločne peči.

Električni lok predstavlja prevajanje električnega toka skozi plin; lok je torej plinski prevodnik toka. V nasprotju s kovinskimi ali tekočinskimi prevodniki toka ima plinsko prevajanje posebne lastnosti, ki se kažejo predvsem v tem, da se ob normalnih pogojih vrši prevajanje le v visokotemperaturnem stanju plina in da je za pričetek prevajanja potreben začetni toplotno-električni vžig loka. Električni lok predstavlja pretok elektronov, ki pri visokih temperaturah (termoemisijsko) izstopajo iz anode, ter pretok ionov, ki se generirajo v plinu z dovolj hitrimi trki elektronov ob njegove atome oziroma molekule. V električnem loku se plin nahaja v plazmi podobnem stanju, kjer so pomešani elektroni, ionizirane molekule in atomi; v plazmi podobnem stanju zato, ker je plazma po definiciji električno nevtralna, električni lok pa ima velik presežek elektronov, ki dosega v stebelu loka do 90% vseh nosilcev električnega toka.

Ločimo enosmerni in izmenični električni lok, glede na to, ali ga vzdržuje enosmerna ali izmenična napetost. Električni lok ima negativno napetostno karakteristiko, kar pomeni, da potrebna napetost gorenja na loku pada z večanjem električnega toka. Lok torej ni stabilen: pri stalni napajalni napetosti narašča preko vseh meja, ker večji tok loka potrebuje manjšo napetost; če napetost znižamo pod določeno vrednost, lok ugasne.

Električnemu loku omogočimo stabilno gorenje na ta način, da v njegov tokokrog vključimo ohmski ali induktivni upor, ki ob povišanem (znižanemu) toku samodejno zniža (zviša) napetost na loku na ravnotežno stanje. Pravimo, da dušilka (pri izmeničnem toku) oziroma upor (pri enosmernem toku) stabilizirata gorenje električnega loka.

Ločimo:

- *vžigna napetost* (U_v), to je napetost, pri katerem se lok prižge: napetost je dovolj visoka za vzpostavitev električnega polja, ki povzroči emisijo elektronov in ionizacijo plina oziroma potrebni napetostni preboj;
- *napetost gorenja* (U_g), to je napetost, ki jo izmerimo neposredno na loku in je odvisna od velikosti električnega toka; napetost gorenja se sestoji iz:
 - katodnega padca napetosti (8–10 V)

- anodnega padca napetosti (25–30 V)
- padca napetosti v stebelu loka (0.8–1.5 V/mm njegove dolžine);
- *ugasna napetost* (U_u), to je napetost, pri kateri lok ugasne.

Za električni lok so značilne različno velike električne poljske jakosti (V/m) ob obeh elektrodah:

- *katodna električna poljska jakost loka*, povzročena z oblakom pozitivnih ionov pred katodo (10 000 kV/m);
- *anodna električna poljska jakost loka*, povzročena z oblakom elektronov pred anodo (15 kV/m);
- *električna poljska jakost stebela loka* (0.8–1.5 V/mm).

Na obeh elektrodah imamo različno velike gostote moči: specifična površinska moč na stiku loka z anodo je bistveno večja od specifične površinske moči na stiku loka z katodo, kar povzroča 6 do 10 krat večjo toplotno abrazijo anodne elektrode.

Gostota elektronov v loku znaša od 10^{16} do 10^{17} elektronov/cm³. Za gorenje električnega loka je potreben tudi minimalen energijski izvor, ki je zmožen vzdrževati potrebno ionizacijsko stanje za njegovo gorenje. Ker je ionizacijsko stanje loka odvisno predvsem od njegove temperature, ta pa je odvisna od toplotnega pretoka lok-okolica, je za gorenje loka neposredno odločujoče prav toplotno stanje njegove okolice.

Poleg statične karakteristike električnega loka poznamo pri izmeničnih pojavih dinamično karakteristiko električnega loka, kjer sta predvsem vidni različno visoki vžigna in ugasna napetost loka. Slednja je vedno nižja od vžigna, kar je posledica toplotne vztrajnosti deionizacijskega pojava, ki ne more slediti hitrosti zmanjševanja izmenične napetosti.

Dinamična karakteristika visokotokovnega izmeničnega loka je prikazana na *sliki 1*, kjer so razvidne sledeče značilnosti takega loka:

- vžigna (U_v) in ugasna (U_u) napetost se po velikosti le malo razlikujeta, vendar nista enaki v obeh polperiodah: padec napetosti ob negativni elektrodi (katodni

padec napetosti) je manjši od padca napetosti ob pozitivni elektrodi (anodni padec napetosti);

- napetost gorenja loka (U_I) znotraj polperiode je skoraj konstantna.

Izmenični lok se v vsaki polperiodi prižiga in ugaša, njegov tok (J_I) se spreminja po velikosti od vrednosti nič do maksimuma ter ponovno do vrednosti nič, ter po smeri tako, kot se v vsaki periodi zamenjmeta katoda in anoda.

Poleg električnih lastnosti loka so za eksploatacijo pomembne njegove geometrijske in toplotne lastnosti.

Glede na konstantno vsoto katodnega in anodnega padca napetosti (30–40 V) ter glede na približno konstantno električno poljsko jakost v steblo loka (1 V/mm) lahko za industrijsko aplikacijo ugotavljamo dolžino izmeničnega loka obločne peči neposredno iz napetosti loka:

$$L_I(\text{mm}) = U_I(\text{V}) - 40,$$

pri čemer moramo upoštevati, da je U_I napetost med elektrodama, med katerima gori električni lok in ne napetost izvora toka (npr. napetost na sekundarnih sponkah pečnega transformatorja).

Premer električnega loka je v splošnem sorazmeren korenu iz njegovega toka:

$$d(\text{mm}) = k\sqrt{J}.$$

Električni lok se sicer ponazarja s cilindrično obliko s premerom po zgornji enačbi (slika 1), vendar je njegova oblika bliže elipsoidnemu telesu, katerega pola predstavljata anodni in katodni stik z elektrodo.

Izmerjene gostote električnega toka v steblo loka znašajo pri toku 10 kA do 15 kA med 1 kA/cm² in 4 kA/cm², kar nam daje premere loka med 2.2 cm in 1.5 cm. Pri toku loka 100 kA in njegovi gostoti 10 kA/cm² pa je premer loka cca 3 cm.

Geometrijsko obliko električnega loka ustvarjajo predvsem sile, ki nanj delujejo:

- električna sila, ki nastaja zaradi toka, stiska steblo loka; ta takoimenovani Pinch-efekt skuša stisniti oziroma preščiipniti lok;
- difuzijska sila deluje v nasprotni smeri kot elektrodinamična sila in zmanjšuje tlak, ki vlada znotraj loka;
- medsebojne sile v trifaznem tokovnem sistemu treh lokov.

Analize kažejo, da znaša pritisk loka na stiku z elektrodo cca 0.8 bara; ker je običajna industrijska napajalna napetost frekvence 50 Hz, pulzirajo elektrodinamične sile loka s frekvenco 100 Hz. Tudi sicer so fizikalni pojavi v loku izredno dinamični: računa se s hitrostmi ionov med 1000 m/s do 2000 m/s oziroma s termično časovno konstanto loka 10^{-5} s.

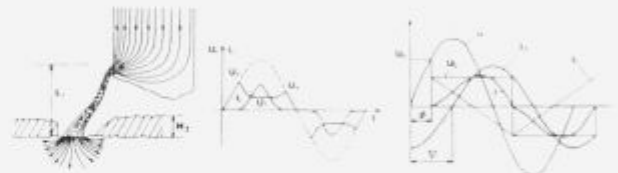
Bistvena aplikativna lastnost električnega loka je njegova visoka temperatura, ki znaša na njegovi površini med 4000°C in 5000°C, v notranjosti pa naraste do 15000°C, oziroma velika toplotna moč, ki se sprošča na loku pri direktni pretvorbi električne energije v toploto: moč posameznega (faznega) loka dosega v modernih obločnih pečeh že 30 000 kW. Povprečna specifična površinska moč električnega loka se giblje med 50 kW/cm² in 200 kW/cm². Sicer pa fizikalni pojavi ob pretvorbi električne moči v

toplotno niso popolnoma pojasnjeni in so zelo kompleksni, saj obsegajo tako regeneracijo plazme in plazmi podobnih visokotemperaturnih stanj, taljenje in uparjanje kovin in elektrodnih snovi, njihovo temperaturno erozijo, ionizacijo, disociacijo molekul itd.

Prenos toplote iz loka na okolico poteka na več načinov:

- s *sevanjem* stebila in avreole, ki po nekaterih podatkih predstavlja le 30% do 60% celotne moči loka;
- s *konvekcijo avreole*, ki z zelo dinamičnimi pojavi na svojem obrobju omogoča intenziven toplotni prenos (50% do 30%);
- s *prevajanjem toplote* na stičnih mestih loka z elektrodo (10% do 20%).

Za analitično obravnavo in za boljše razumevanje razmer pri industrijskih aplikacijah loka so primerna idealizirana stanja napetosti in tokov pri izmeničnem električnem loku, kot so prikazane na desni strani slike 1.



Slika 1. Karakteristika izmeničnega električnega loka.

Figure 1. Characteristic of alternating current.

Za vžig loka potrebno vžigno napetost U_v dobimo po preteku časa φ od prehoda napajalne napetosti skozi nič in šele od tega trenutka naprej lahko steče tok med elektrodama, na samem loku pa se pojavi napetost gorenja U_I , ki je neodvisna od velikosti toka loka. Obliko toka loka lahko dobimo z rešitvijo diferencialne enačbe ravnovežnega stanja in robnih pogojev kot vsoto dveh tokov:

- toka J_1 , ki je linearna komponenta toka loka z maksimalno vrednostjo v točkah vžiga loka; v idealiziranih razmerah sta vžigna in ugasna napetost enaki, kar pomeni, da se ob ugasnitvi loka v času prevajanja v pozitivno smer istočasno ta prižge za prevajanje toka v negativno smer.
- toka J_2 , ki je čista sinusna vrednost, ki ima glede na gonilno napetost časovno zakasnitev φ .

Dobljeni rezultati pojasnjujejo praktične pojave pri obratovanju naprav z izmeničnim električnim lokom, kjer:

- razmerje med ohmskim (R) in induktivnim (X) bremenom določa časovno zakasnitev toka J_2 proti sinusnemu poteku napetosti;

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

- zakasneli vžig električnega loka pomeni zakasnitev pričetka prevajanja toka, kar neposredno pomeni tem slabšo vrednost $\cos \varphi$, čim večja je napetost gorenja loka proti njeni temenski vrednosti gonilne napetosti:

$$\cos \varphi = \cos \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{U_I}{U_t} \right)$$

- rezultirajoči tok loka ni več sinusne oblike, ker je izgubil simetričnost glede na absciso in glede na ordinato.

S harmonsko analizo lahko ugotovimo, da zaradi take popačitve nastopijo v napajalnem omrežju lihi višji harmonski tokovi 5×50 Hz, 7×50 Hz, 11×50 Hz, 13×50 Hz itd. Kot posledica različne napetosti električnega loka v obeh smereh prevajanja toka, ki nastanejo zaradi razlike med anodnim in katodnim padcem napetosti, nastopajo tudi sodi višji harmonski tokovi 2×50 Hz, 4×50 Hz, 6×50 Hz. Ker višje harmonske komponente toka dodatno povzročijo poslabšanje rezultirajočega obratovalnega $\cos \varphi$, je ta vedno slabši, kot bi bil samo zaradi zakasnitve vžiga, slabši pa je tudi zaradi tega, ker so popačitve v realnih razmerah večje, kot jih da idealizirani izračun; in seveda tudi zato, ker nastopajo v tokokrogu z električnim lokom vedno tudi induktivne upornosti lastnega napajalnega sistema.

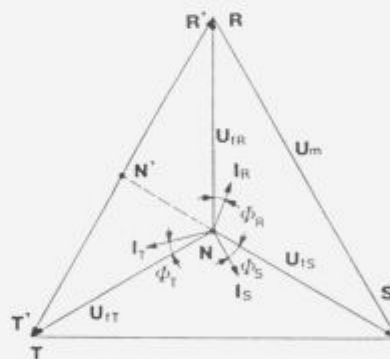
V enofazni elektroobločni peči se električni lok prižge tako, da se elektroda dotakne vložka (ali druge elektrode): torej s kratkim stikom: v tem trenutku steče v sklenjenem tokokrog krakostičen tok, ki v hipu visoko segreje stično mesto elektrode z vložkom. Grafit elektrode in kovina vložka se segrejeta do uparitve oziroma do ionizacije; če primerno hitro razmaknemo elektrodo od vložka in če imamo na razpolago odgovarjajočo napetost, se ob tem potegne lok (Thowsendov vžig), ki bo gorel stabilno, ustrezno ionizacijskim pogojem oziroma ustrezno razdalji elektroda — vložek. Ob nadaljnjem povečevanju odmika elektroda — vložek bo glede na podano napajalno napetost lok ugasnil, saj bi daljšemu loku ustrezala neka druga višja napetost. Vzdrževanje gorenja loka pomeni ohranjanje dobrih ionizacijskih pogojev in vzdrževanje določenega razmaka med elektrodo in vložkom. Mimo gorenje električnega loka je mogoče le v primeru, ko ima lok po vsakokratnem prehodu toka skozi vrednost nič pogoje za lahek ponoven vžig. Poleg ustrezne toplotnotehnične mikroklimi v neposredni bližini loka zagotavlja ponovno prižiganje loka dovolj zgodaj nastajajoča vžigna napetost: zaradi v pečnem tokokrogu prisotnih induktivnih upornosti ima gonilna napetost ob prehodu toka skozi nič že dovolj visoko trenutno vrednost, ki je blizu potrebni vžigni napetosti. Pravimo, da induktivnost v tokokrogu z lokom stabilizira njegovo gorenje; v električni tokokrog obločne peči zato vgrajujemo dušilke ali posebej grajene transformatorje s povišano samoinduktivnostjo. Vžig in gorenje loka v obločni peči sta podoben proces kot ga imamo pri izmeničnem obločnem ročnem varjenju, le da so elektrotplotne vrednosti pri obločni peči za nekaj velikostnih razredov večje.

Pri obratovanju naprav z električnim lokom moramo poleg popačitve sinusnih vrednosti tokov in napetosti in dokajšnjega deleža jalove moči, računati še s spremenljivimi obremenitvami, ki sežeje od kratkega stika (vžig loka) do praznega teka (ugasnitev loka). Obločne peči za industrijsko aplikacijo so grajene tako, da je velikost kratkega stika omejena na dva- do tri-kratno vrednost nazivnega toka naprave. Pravimo, da mora imeti obločna peč svoji nazivni moči ustrezno impedančno prilagoditev. Razmeje med kratkostično močjo napajalnega omrežja in krakostično močjo obločne peči je odločujoče za vpliv obratovanja peči na stabilnost napajalne napetosti (nastanek flikerjev), zato je potrebna tudi prilagoditev moči obločne peči karakteristikam napajalne mreže.

Gorenje treh električnih lokov pri trifazni obločni peči se od opisanega razlikujejo le v posebnostih trifaznega napajalnega sistema, ki nima ničelnega vodnika. Za tak sis-

tem velja pravilo, da mora biti vektorska vsota vseh treh faznih tokov vedno nič. Trifazni sistem napetosti in tokov obločne peči je prikazan na **sliki 2**: posamezne medfazne napetosti (U_m) so podobno kot fazne napetosti (U_f) medsebojno zamaknjene (časovno vektorsko gledano) po 120 stopinj; medfazna napetost je vedno za $\sqrt{3} = 1.73$ večja od ustrezne fazne napetosti. Kazalčne lege elektrodnih tokov so odvisne izključno od razmerja delovnih in jalovih komponent toka pod ustreznimi napetostmi lokov posameznih faz. Dogovorno leži tok loka vedno v fazi z napetostjo loka. Posebnost obratovanja takega sistema treh napetosti je v tem, da nevtralna (ničelna) točka sistema ni fiksirana (s posebnim nevtralnim vodnikom), ampak se premika znotraj napetostnega trikotnika: fazna napetost katerekoli faze se zato lahko spreminja od vrednosti nič do vrednosti medfazne napetosti.

Opis dogajanj je najenostavneje pričeti z začetkom obratovanja take peči. Elektrode se spuščajo proti vložku tako dolgo, dokler se ga ne dotaknejo: ko se ga dotakne prva elektroda, še ne pride do kratkega stika, ker električni tokokrog ni sklenjen. To se zgodi, ko se vložka dotakne druga elektroda; kratkostični tok povzroči odmik te elektrode in vžig loka, na katerem leži sedaj celotna medfazna napetost. Šele potem, ko se odmakne druga elektroda, ki je bila v kratkem stiku, in se prižge lok tudi pod njo, se medfazna napetost razdeli na napetosti obeh lokov; sorazmerno z nastavitvijo dolžine obeh lokov, saj je tok za oba loka po velikosti enak. (Na **sliki 2** predstavlja tak trenutek točka N' v primeru, da sta bili opisani elektrodi R' in T').



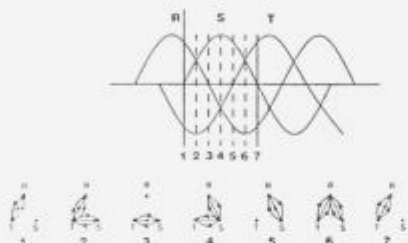
Slika 2. Trifazni sistem napetosti in lokov.

Figure 2. Three-phase system of voltages and arcs.

Od trenutka, ko se je prižgal lok tudi v tretji fazi, kar se je zgodilo po tem, ko se je tudi ta elektroda dotaknila oziroma se odmaknila od vložka, se premakne obratovalna nevtralna točka v novi položaj (iz N' v N), ki ga sedaj določajo vse tri dolžine posameznih lokov, oziroma vse tri napetosti posameznih lokov. Če sta bili na **sliki 2** napetosti pod lokoma faz R in T enaki (polovični medfazni napetosti) se od trenutka vžiga loka v fazi T spreminja (povečuje) napetost loka v fazi R in T in sicer tem bolj, čim bolj se premika nevtralna točka proti središču napetostnega trikotnika. Vidimo značilno lastnost sistema trifaznih električnih lokov, da sprememba gorenja enega loka povzroča spremembo napetosti pod drugima lokoma, čeprav vladajo tod stabilne razmere. Delovno moč takega trifaznega sistema lahko določimo le z vsoto delovnih moči posameznih faz:

$$P_d = U_{fR} I_R \cos \varphi_R + U_{fS} I_S \cos \varphi_S + U_{fT} I_T \cos \varphi_T.$$

Električni lok ugasne pri vsakem prehodu toka skozi nič: ugaša in prižiga se torej z dvojno mrežno frekvenco t.j. s 100 Hz. Pri trifaznem sistemu napetosti oziroma tokov se vrsti ugašanje in prižiganje lokov pod elektrodami na enak način s tem, da vsaka ugasnitev sosednje elektrode kasni oziroma prehiteva za 6,66 ms, kar ustreza 120 stopinj prehitevanja oziroma kasnjenja sosednjih faz trifaznega sistema. Na **sliki 3** je prikazan trifazni sistem tokov, iz katerega se ta kasnitev faz *R*, *S*, *T* lepo vidi. Na spodnjem delu slike je podanih sedem zaporednih trenutkov gorenja lokov pod posameznimi fazami (elektrodami) in pripadajoče smeri tokov. Trenutki so zaradi enostavnejšega prikaza izbrani s presledki 30 stopinj ali 1,66 ms: v 10 ms ali v času ene polperiode elektroda *S* dvakrat ne vodi električnega toka — torej lok pod elektrodo resnično ugaša z dvojno frekvenco!



Slika 3. Gorenje električnega loka pri trifaznem sistemu tokov.

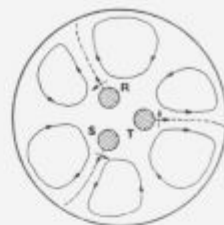
Figure 3. Arc operation in a three-phase system of currents.

Geometrijska zamaknitev posameznih elektrod za 120 stopinj in istočasna fazna zamaknitev poteka tokov trifaznega sistema za 120 stopinj povzroči (po Teslinem principu) vrtilno magnetno polje pod elektrodami obločne peči. Iz spodnjega prikaza na **sliki 3** vidimo, da je v času od trenutka 1 do trenutka 7 t.j. v eni polperiodi (10 ms) zarotiralo elektromagnetno polje za 180 stopinj: potreben čas za celoten obrat je torej čas cele periode, ki traja pri frekvenci 50 Hz $1/50 \text{ s} = 20 \text{ ms}$. Na sekundo zarotira polje 50 krat, oziroma s 3000 obrati na min, kar je sinhrono število vrtiljajev dvopolnega stroja. Med vrtilnim magnetnim poljem in obločnimi tokovi posameznih elektrod nastopajo sile, ki hočejo pomakniti steblo loka navzven proti steni peči: lok pri trifazni obločni peči gori vedno nekoliko poševno nagnjen od zunanje roba elektrode tako, da sili navzven v korenu loka (glej **sliko 1**). Smer vrtenja elektromagnetnega polja pod elektrodami določa fazno zaporedje *R*, *S*, *T*. Poleg opisanih sil, ki delujejo na električni lok, delujejo te pulzirajoče sile tudi na elektrode ter v končni konsekvenci tudi na talino. Sistem sil in smer gibanja taline v obločni peči kaže **slika 4**. Sile, ki nastopajo, so odvisne predvsem od jakosti toka, od simetričnosti obremenitev posameznih faz ter od premera delilnega kroga elektrod. Globina vdiranja električnega toka v talino ni večja kot 60 mm, zato je mešanje taline omejeno predvsem na njeno površino.

V elektroenergetskih obračunavanjih karakterističnih stanj obločne peči ponazarjamo električno moč loka z njegovo nadomestno ohmsko upornostjo:

$$R_l = \frac{P_l}{J_l^2},$$

kar pa velja le v zelo grobem približku samo za zelo stabilno obratovanje pri popolnoma raztaljenem vložku. V splošnem je potrebno poleg čiste ohmske upornosti loka v izračunih upoštevati še njegovo navidezno induktivno upornost X_l .



Slika 4. Površinski tokovi v kopeli obločne peči in sile nanjo.

Figure 4. Surface currents in the melt of arc furnace and forces on it.

Za določena tehnološka stanja v peči ima razmerje obeh upornosti $\delta = X_l/R_l$ karakteristične vrednosti; za fazo taljenja na pr. velja $\delta = 0.30-0.60$, za fazo raztaljenega vložka pa je $\delta = 0.05-0.15$. Razmerje δ je določljivo iz izmerjene vrednosti za obratovalno induktivno upornost X_0 in iz pripadajočega faznega faktorja $\cos \varphi$:

$$\delta = \frac{\gamma \left(\frac{x_0}{x_k} - 1 \right)}{\gamma \frac{x_0}{x_k} \operatorname{ctg} \varphi - 1}.$$

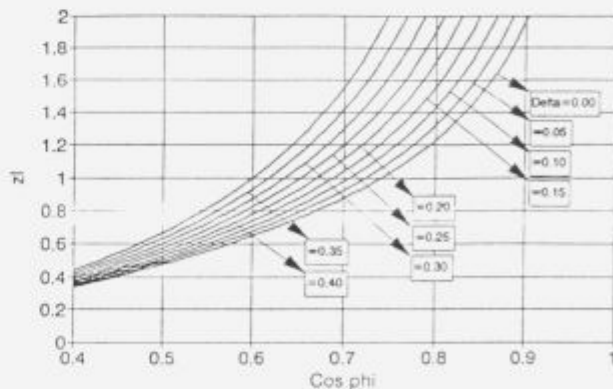
Impedančna upornost loka je glavna regulacijska veličina elektroobločne peči; definirana je kot geometrijska vsota induktivne in ohmske upornosti loka. Absolutno vrednost impedančne upornosti loka Z_l (mΩ) dobimo po definiciji iz njegove relativne vrednosti z_l in iz kratkostične induktivne upornosti peči X_k (mΩ):

$$Z_l = z_l X_k.$$

Relativna vrednost impedance loka je kot razmerje med napetostjo loka (e_l) in njegovega toka (j) ter ustrezno z izvajanjem v^1 definirana:

$$z_l = \frac{\gamma \sqrt{1 + \delta^2}}{(\gamma - \delta)^2} (\operatorname{tg} \varphi - \delta) (\gamma - \operatorname{tg} \varphi) \cos^2 \varphi.$$

Potek odvisnosti impedance loka je v odvisnosti od $\cos \varphi$ ter obeh razmernostnih faktorjev γ in δ prikazan na **sliki 5**.



Slika 5. Relativna impedanca električnega loka z_l , $\gamma = 10$.

Figure 5. Relative impedance of electric arc z_l , $\gamma = 10$.

Podrobno so analizirana realna elektroenergetka stanja obločne peči, ki jih dobimo s pomočjo razmernostnih faktorjev kratkostičnih upornosti obločne peči (γ) upornosti loka (δ), $v^1 \text{ in}^2$.

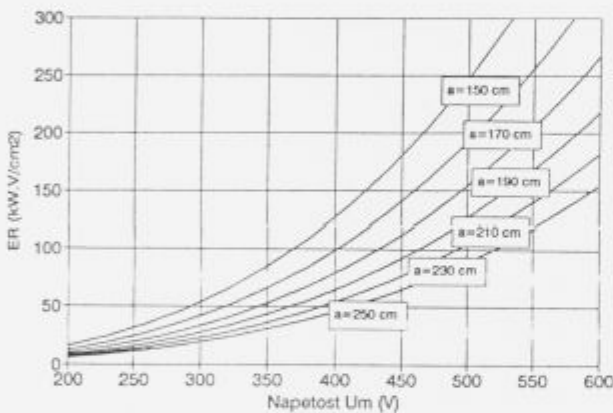
Toplotnotehniške razmere v obločni peči so v največji meri odvisne od geometrije in fizike loka: sevanje loka v prostor je odvisno od moči loka (napetost loka krat tok loka) ter od njegove dolžine, ki je, kot smo videli, sorazmerna napetosti loka. Erozijski indeks (kW V/cm^2), ki opisuje sevalne lastnosti električnega loka na obzidavo peči, je zato sorazmeren produktu moči loka (P_l) in njegove napetosti (U_l) ter obratno sorazmeren z kvadratom oddaljenosti loka od stene peči (a):

$$ER = \frac{U_l^2 J}{a} \quad (\text{W V/cm}^2).$$

Erozijski indeks lahko izrazimo tudi z napetostjo transformatorja (U_t), induktivno upornostjo peči (X_k), razdaljo lok-stena (a) in z relativno vrednostjo erozijskega indeksa Er :

$$ER = \frac{U_t^3}{X_k a^2} Er \quad (\text{W V/cm}^2).$$

Važno spoznanje za gradnjo obločnih peči je dejstvo, ki izhaja iz zgornje enačbe, da narašča obremenjenost pečne obzidave s tretjo potenco transformatorjeve napetosti in pada s kvadratom razdalje elektroda-stena (slika 6).



Slika 6. Erozijski indeks ER obločne peči v odvisnosti od napetosti transformatorja U_t in razdalje elektrode od stene a , $\gamma = 10$, $\delta = 0.15$, $\cos \varphi = 0.75$.

Figure 6. Erosion index ER of arc furnace depending on transformer voltage U_t and electrode-wall distance a , $\gamma = 10$, $\delta = 0.15$, $\cos \varphi = 0.75$.

Za vodenje obratovanja obločne peči pri določeni napetosti in pri dani geometriji peči je običajno dovolj, če poznamo potek relativnega erozijskega indeksa v odvisnosti od toka loka ali faznega faktorja $\cos \varphi$. Za idealizirane razmere relativno vrednost erozijskega indeksa izrazimo:

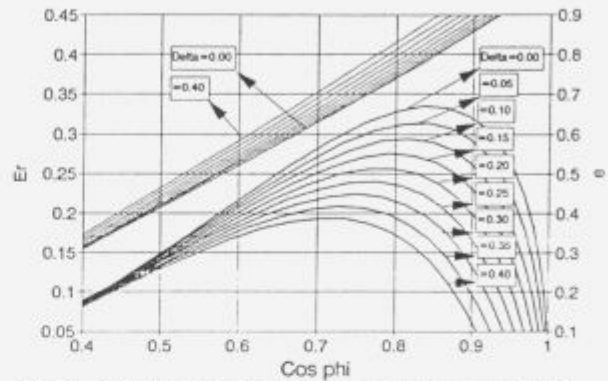
$$Er = \frac{\gamma}{(\gamma - \delta)^3} (\gamma \cos \varphi - \sin \varphi)^2 (\sin \varphi - \delta \cos \varphi).$$

Ker je napetost loka (in s tem tudi njegova dolžina) pri določeni transformatorski napetosti značilno sorazmerna z faznim faktorjem $\cos \varphi$, lahko za potek relativne napetosti loka in za realne razmere zapišemo tudi odvisnost:

$$e_l = \frac{1}{\gamma - \delta} (\gamma \cos \varphi - \sin \varphi).$$

Slika 7 kaže potek obeh relativnih vrednosti za simulacijo realnih razmer v obločni peči, ki jo omogoča vnos

razmernostnega faktorja δ , kot razmerja med virtualno induktivno upornostjo in nadomestno ohmsko upornostjo loka: dolžina loka raste z naraščajočim $\cos \varphi$, maksimalne vrednosti erozijskega indeksa pri raztaljenem vložku pa nastajajo vedno v določenem razponu $\cos \varphi = 0.82-0.86$, zato se moramo takega obratovanja pri raztaljenem vložku izogibati.



Slika 7. Relativen erozijski indeks Er in relativna napetost loka e_l , $\gamma = 10$.

Figure 7. Relative erosion index Er and relative arc voltage e_l , $\gamma = 10$.

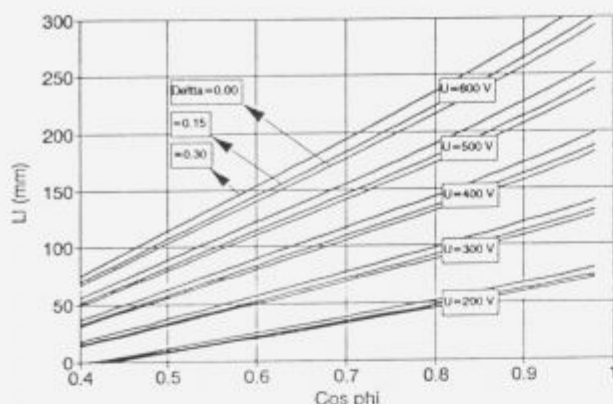
Pri klasično obzidani peči nastanejo omejitve obratovanja z maksimalno dopustno temperaturo obzidave peči (na pr. 1670°C) oziroma z maksimalnim erozijskim indeksom 30 do 50 kW V/cm^2 , pri peči z vgrajenimi vodnohlajenimi stenami pa z maksimalno dopustno toplotno obremenitvijo teh elementov (na pr. 300 kW/m^2) oziroma z mnogo višjim dopustnim erozijskim indeksom (na pr. 80 kW V/cm^2).

Pri obratovanju z zakritim lokom, kjer je lok obdan z neraztaljenim vložkom, ni nevarnosti sevanja loka na obzidavo peči, ob raztaljenem vložku pa zakriva sevanje loka le žilindra, katere višina nad kopeljo je izrazit tehnološki parameter, zato je vodenje obratovanja obločne peči v tej fazi odvisno ne le od potrebne dovedene moči za segrevanje in kritje toplotnih izgub peči temveč tudi od dovoljene dolžine loka. Potrebujemo torej dejansko dolžino loka:

$$\begin{aligned} L_l &= \frac{U_t}{\sqrt{3}} e_l - 40 \quad (\text{mm}) \\ &= \frac{U_t}{\sqrt{3}} \frac{1}{\gamma - \delta} (\gamma \cos \varphi - \sin \varphi) - 40 \quad (\text{mm}) \end{aligned}$$

Ustrezni rezultati so podani na sliki 8. V splošnem velja, da imamo obratovanje s kratkim lokom pri nizkih napetostih in nizkih faznih faktorjih $\cos \varphi$ in obratno.

Že uveljavljeno merilo za okarakterizacijo loka v obločni peči je takoimenovani faktor loka θ (mm/kA), za katerega velja, da je poleg napetosti in $\cos \varphi$ odvisen še od induktivne upornosti peči X_k in razmernostnega faktorja δ tako, da faktor loka raste z naraščajočo upornostjo in z naraščajočim razmerjem δ . Če poenostavimo, da kot napetost loka upoštevamo le vrednost, dobljeno iz njegove dolžine in iz njegove električne poljske jakosti 1 V/mm , so izračunane vrednosti za θ izražene v mm/kA že tudi približne vrednosti impedančne upornosti loka Z_l izražene v $\text{m}\Omega$. Za označitev loka veljajo sledeče vrednosti faktorjev loka po tabeli 1, kjer so prikazani tudi približki ustreznih upornosti loka.



Slika 8. Dolžina električnega loka L_l v odvisnosti od transformatorske napetosti U_t in $\cos \varphi$, $\gamma = 10$.
Figure 8. Length of electric arc L_l depending on transformer voltage U_t and power factor $\cos \varphi$, $\gamma = 10$.

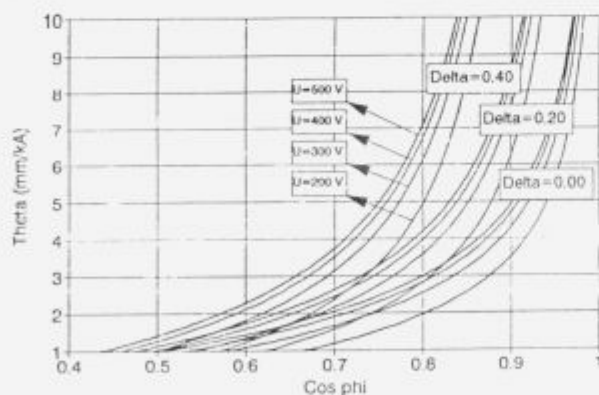
Tabela 1. Karakteristične vrednosti električnega loka obločne peči

	Faktor loka θ (mm/kA)	Približna impedanca loka Z_l (m Ω)
kratek lok	$\theta = 1-3$	1-3
srednje dolgi lok	$\theta = 3-4$	3-4
dolgi lok	$\theta = 4-8$	4-8

Značilni potek faktorja loka kaže **slika 9**. Za idealizirane razmere ($\delta = 0.00$) lahko dobimo faktor loka tudi kot od napetosti neodvisen poenostavljeni približek:

$$\theta = X_k \operatorname{ctg} \varphi - 1 \quad (\text{mm/kA}),$$

v katerem je X_k podan v m Ω .



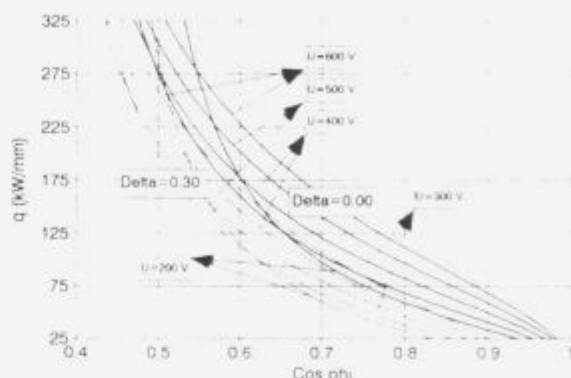
Slika 9. Faktor loka θ v odvisnosti od transformatorske napetosti U_t , induktivne upornosti peči X_k in $\cos \varphi$, $\gamma = 10$, $X_k = 3$ m Ω .
Figure 9. Arc factor θ depending on transformer voltage U_t , inductive reactance of furnace X_k and power factor $\cos \varphi$, $\gamma = 10$, $X_k = 3$ m Ω .

Poleg razmernostnega faktorja upornosti loka δ , absolutnega (ER) in relativnega erozijskega indeksa (Er) loka, dolžine loka (L_l) ter faktorja loka (θ) imamo kot njegovo značilno lastnost še specifično moč loka (q), ki je podana

kot razmerje med močjo loka in njegovo dolžino:

$$q = \frac{U_t}{\sqrt{3}} \cdot \frac{e_l}{\theta} \quad (\text{kW/mm}).$$

Ustrezne odvisnosti so podane na **sliki 10**.



Slika 10. Specifična moč električnega loka q v odvisnosti od transformatorske napetosti U_t in $\cos \varphi$.
Figure 10. Specific power of arc q depending on transformer voltage U_t and power factor $\cos \varphi$.

Realna razmerja posameznih delov sevalnih moči električnega loka, ki slede Stefan-Bolzmannovemu zakonu, v katerem izražajo sevalni in ploskovni integracijski faktorji medsebojno sevanje i -površine na j -površino, lahko na osnovi označb na Sl.1 izrazimo v odvisnosti od dolžine loka, debeline žlindre in od ostalih geometrijskih posebnosti obločne peči. Ločiti moramo moč električnega loka ter moč stebra loka, ki se od moči loka razlikuje za vsoto moči na anodnem in katodnem delu loka, kakor tudi del moči loka, ki se na okolico prenaša s konvekcijo. Za obratovanje obločne peči so važne predvsem moči, ki jih absorbira talina, žlindra in obzidava peči.

Posamezni deleži moči so odvisni tako od čistih elektrotehniških parametrov obločne peči, kakor tudi od njenih konstrukcijskih posebnosti (višina žlindre, oddaljenost elektrod od obzidave oziroma od panelov peči, razdalja oboka peči od taline) in od ostalih toplotnotehniških procesov v peči — predvsem od oksidacije elementov v talini in v žlindri, ki določajo velikosti deležev konvekcijskih toplotnih moči. Kako se deleži posameznih moči spreminjajo z debelino žlindre, je za primer konstantne dolžine loka in za različne višine žlindre prikazano v **tabeli 2**.

Tabela 2. Deleži sevalne moči električnega loka v odvisnosti od debeline žlindre

H_z (cm)	P_{l_t} (%) na talino	P_{l_s} (%) na žlindro	P_{l_o} (%) na obzidavo
10	45	25	30
20	40	35	25
30	35	45	20

Ker prenašamo električno moč s pomočjo električnega loka kot toplotno moč neposredno na vložek, na žlindro in na obzidavo peči, vplivajo razmere okrog električnega loka na izkoristek tega prenosa. Ločimo predvsem dve karakteristični obratovalni fazi obločne peči: fazo taljenja, v

kateri je lok večinoma zakrit z vložkom in raztaljeno fazo, v kateri lahko lok mnogo bolj nezasenčeno seva v okolico. Za doseganje dobrih toplotnih učinkov pri izdelavi jekla sta važni obe fazi: toplotne izkoristke lahko štejemo od vrednosti nič pri kratkem stiku, ko je elektroda v stiku z vložkom ali s talino, do vrednosti cca 90% v fazi taljenja, ko imamo električni lok popolnoma zakrit z obdajajočim vložkom, ali v raztaljeni fazi, ko imamo pri tehnologiji peneče žlindre lok tudi obdan z žlindro. V splošnem dosegamo v času taljenja srednje toplotne izkoristke nad 70%, v raztaljeni fazi pa so toplotni izkoristki vedno nižji.

Zaključek

Toplotnotehniške in elektroenergetke karakteristike trifazne obločne peči za proizvodnjo jekla so neposredno povezane z značilnostmi izmeničnega električnega loka in z razmerami, ki nastajajo ob njegovem gorenju v peči pri posameznih tehnoloških fazah izdelave jekla. Prilagoditev zahtevam stabilnega gorenja električnega loka se kaže predvsem v potrebni izbiri električnih parametrov: moč, razpon napetosti, razpon toka, induktivna upornost napajalnega sistema vključno z visokotokovnim dovodom na peč, s pečnim transformatorjem in napajalnim elektroenergetskim omrežjem. Fizikalne lastnosti loka so opisane z dolžino loka (L_1), faktorjem loka (θ), s specifično močjo loka (q), njegovo absolutno (Z_1) in relativno (z_1) impedančno upornostjo, erozijskim faktorjem (ER) in njegovo relativno vred-

nostjo (Er), z razmerjem (δ) kot kvocientom med virtualno induktivno upornostjo loka (X_1) in njeno nadomestno ohmsko upornostjo (R_1), kakor tudi z osnovnimi karakteristikami peči kot je razmerje (γ), ki ponazarja kvocient iz kratkostične induktivne upornosti (X_k) in kratkostične ohmske upornosti (R_k) peči. Podane so odvisnosti navedenih parametrov od obratovalnih napetosti transformatorja ter od obratovalnega faznega faktorja $\cos \varphi$, ki je glavno merilo za določitev impedance loka kot vodilne regulacijske veličine regulacije moči loka in je tudi splošni parameter, s pomočjo katerega je mogoče skupno s faktorjem δ objektivno ugotavljati obratovalna stanja obločne peči za proizvodnjo jekla.

1 Literatura

- 1 Bratina Janez: Obratovalni elektroenergetski model obločne peči za proizvodnjo jekla, ŽZB 23, 1989/2
- 2 Bratina Janez: Obratovalni elektroenergetski model obločne peči za proizvodnjo jekla — grafičen prikaz, ŽZB 24, 1990/2
- 3 Tsutsuro Miashita: Experience of Long Arc Operatin for Electric Arc Furnace, UIE Malaga 11 1988
- 4 I. Ignatov: Calculation of Thermal Operations of UHP Arc Furnace, UIE 10 Stockholm 1984
- 5 N.P. Lyakishev: Heating of Molten Metal Bath in UHP Electric Arc Steelmaking Furnace, Sixth International Iron and Steel Congress, Nagoya 1990

Zusammenfassung

Die Wärmetechnischen und elektroenergetischen Charakteristiken des dreiphasen Lichtbogenofens zur Erzeugung von Stahl sind unmittelbar mit den Eigenheiten des elektrischen wechselstrom Lichtbogens und mit den Verhältnissen die beim Brennen des Lichtbogens im Ofen entstehen, bei den einzelnen technologischen Phasen der Stahlerzeugung, verbunden.

Die Anpassung den Forderungen für ein stabiles Brennen des Lichtbogens äussert sich vor allem in der nötigen Auswahl der elektrischen Parameter: Leistung, Spannungsspannweite, Stromspannweite, induktiver Widerstand des Speisungssystems einschliesslich mit den Hochstromzuführungen zu dem Ofen, mit dem Ofentransformator und dem elektroenergetischen Speisungsnetz.

Die physikalischen Eigenschaften des Lichtbogens sind beschrieben durch die Lichtbogenlänge (L_1) den Lichtbogenfaktor (θ), durch die speziphische Lichtbogenleis-

tung (q) seinem absoluten (Z_1) und relativen (z_1) Impedanzwiderstand, dem Erosionsfaktor (Er) mit dem Verhältniss (δ) als Quotient zwischen dem virtuellen induktiven Widerstand des Lichtbogens (X_1) und seinem ohmschen Ersatzwiderstand (R_1), wie auch durch die Grundcharakteristiken des Ofens wie das Verhältniss (γ) der den Quotient aus dem induktiven Kurzschlusswiderstand (X_k) und des ohmschen Kurzschlusswiderstandes des Ofens (R_k) veranschaulicht. Gegeben sind die Abhängigkeiten der genannten Parameter von den Betriebsspannungen des Transformators wie von dem Betriebsphasenfaktor $\cos \varphi$ der der Hauptmasstab für die Bestimmung der Impedanz des Lichtbogens als der führenden Regulierungsgrösse für die Regulation der Lichtbogenleistung ist, aber auch ein allgemeiner Parameter mit dessen Hilfe zusammen mit dem Factor δ möglich ist den Betriebszustand des Lichtbogenofens für die Erzeugung von Stahl objektiv zu bestimmen.

Summary

Heat-engineering and electrical characteristics of three-phase steelmaking arc furnace are directly dependent on the characteristics of alternating electric arc, and on the conditions being formed during its appearance in the furnace at single technological stages of steelmaking. Adaptation to the demands of stable electric arc can be achieved mainly by choosing electrical parameters: power, voltage range, current range, inductive reactance of supply system including high-current lead to the furnace, furnace transformer, and supply electrical network. Physical properties of arc are described by the length of arc (L_1), arc factor (θ), specific arc power (q), its absolute (Z_1) and relative (z_1) impedance resistance, erosion factor (ER) and its relative value (Er),

the ratio (δ) between virtual inductive reactance of arc (X_1) and the substituted ohmic resistance (R_1), and also by the basic characteristics of furnace, e.g. ratio (γ) representing ratio of short-circuit inductive reactance (X_k) and short-circuit ohmic resistance (R_k) of furnace. Relations of the previously mentioned characteristics with the operational voltages of transformer and with operational power factor which is the main parameter in determining arc impedance as the most important regulation quantity in controlling arc power are presented. Power factor is also general parameter which enables together with the ratio δ to determine objectively the operational conditions of steelmaking electric arc furnace.