

Elektroobložna peč danes

J. Bratina*

UDK: 621.365:669.041
ASM/SLA: D5, W18s, A5f

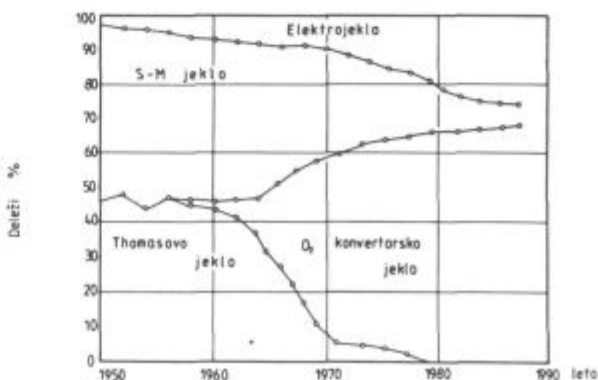
V članku je prikazan zgodovinski razvoj elektroobložne peči za proizvodnjo jekla oziroma njenih tehničnih in tehnoloških faz, ki so omogočile, da je danes delež tako pridobljenega jekla že blizu 25 % svetovne proizvodnje jekla. Podane so njene elektroenergijske karakteristike, vplivi na napajalno omrežje ter pogoji obratovanja glede na racionalno izrabo električne moči v elektroenergetskem sistemu. Primerjave energijskih in toplotnotehniških posebnosti med običajno (RP) in močnostno (UHP) pečjo potrjujejo še vedno prisotne tendence vedno večje izrabe električne energije in vedno večje proizvodnosti agregata. Podane so metode določanja realnih elektrotehničnih vrednosti obložne peči (obratovalna induktivna upornost, napetost, elektrodni tok), oziroma realnih obratovalnih stanj, ki so odločilnega pomena za vodenje obložne peči, tako v času taljenja kakor tudi v času raztaljenega vložka. Optimiranje obratovanja ni omejeno le na določitev pogojev za maksimalno moč na loku ali za maksimalni energijski izkoristek, temveč se razširja od energijskega na stroškovno optimiranje, ki poleg energijskih in stalnih stroškov obratovanja upošteva še stroške za ognjevzdržen material in za porabo grafitnih elektrod. Energijski in stroškovni obračuni v teku izdelave šarže spremenljivih obratovalnih stanj elektroobložne peči omogočajo vrednotenje različnih scenarijev taljenja peči. Rezultati stroškovnega optimiranja potrjujejo pravilnost obratovanja klasične močnostne peči pri nizkih faznih faktorjih $\cos \varphi = 0,60$ (kratek lok), oziroma pravilnost obratovanja moderne močnostne peči z vodnohlajenimi paneli pri visokih faznih faktorjih $\cos \varphi = 0,84$ (dolgi lok); podani so napotki za stroškovno optimalno vodenje procesa v teku celotne izdelave šarže. Obravnavana je možna letna proizvodnja elektroobložne peči glede na izrabo obratovalnega časa, teže vložka, specifične moči pečnega transformatorja ter v odvisnosti od potrebnih tehnoloških časov.

Razvoj

Elektroobložna peč se je razvila iz prvotnega eksotičnega agregata za izdelavo specialnih legur in za študij različnih vrst žilinder, s čimer se je v letih 1900—1903 pr-

vi ukvarjal Francoz Paul Heroult v La Pazou v Savoyi. Prve patentne prijave Siemens o uporabi električnega loka za taljenje težko taljivih materialov segajo v leto 1879 in bi zato že lahko govorili o stoletnici elektroobložne peči. Da se je Heroultova zamisel o prednostih visokotemperaturne žilindre v njegovi peči lahko prebila iz tradicionalnih okvirjev izdelave jekel v Siemens-Martinovi peči oziroma Thomasovi hruški, gre zahvala srečanju iznajditelja z Richardom Lindbergom, lastnikom jeklarne v Remscheidu, kjer so leta 1906 uspešno dali v obratovanje 500-kg elektroobložno peč.

Peč je bila izdelana v Demagu; zanimivo je, da je še istega leta bila dana v obratovanje enaka peč, in sicer v ZDA v mestu Syracuse. Prva enofazna elektroobložna peč je zaradi svoje majhne električne moči in drage električne energije uporabljala kot vložek talino iz Martinove peči in šele s prehodom na trofazni omrežni priključek je bilo mogoče zgraditi peč, ki je lahko gospodarno talila odpadke oziroma staro železo kot standardni vložek. Bilo je potrebnih 20 let tehnološkega razvoja v gradnji elektroenergetskih, merilnih in regulacijskih naprav ter 20 let tehnološkega osvajanja, da je bilo mogoče v novem jeklarskem agregatu izdelati vse vrste znanih jekel. (Sl. 1) Po drugi svetovni vojni se je elektroobložna peč uveljavila kot standardna enota zmogljivosti 20 t; delež elektrojekla v skupni svetovni proizvodnji jekla pa se je



Slika 1:

Delež tehnoloških postopkov v proizvodnji jekla

Fig. 1:

Share of single process in steelmaking

* Janez Bratina, dipl. inž. el. teh. — Železarna Ravne Stanovanje: Dobja vas 99, Ravne na Koroškem
Rokopis prejet: december 1987
Originalno publicirano: Železarski zbornik, 22, 1988, 2

ob tem že povzpel na 5 %. Tudi eksploziven razvoj kislkovega konvertorja ni mogel zaustaviti rasti proizvodnje jekla v elektroobložni peči. Cenovna razmerja surovin in energije, ki so se odražala predvsem v cenemem starem železu in ceneni električni energiji, kot posledici velikih povojnih vlaganj sproščenega kapitala v elektroenergetske objekte ter predvsem nizki specifični naložbeni stroški v primerjavi z integralnimi železarnami so pospeševali gradnjo vedno večjih elektroobložnih peči. Proizvodne enote so dosegle kapaciteto 100 t, 150 t, 200 t, 250 t; tekmovanje med Evropo, ZDA in porajajočo se Japonsko je seglo tudi na to področje. Kmalu pa je zniževanje specifičnih proizvodnih stroškov kot neposredna posledica gradnje vse večjih proizvodnih kapacitet zadelo ob meje novonastalih problemov, kot na pr. pri ekstremnih premerih elektrod, pri izrednih elektrodnih tokovih, pri moči pečnih transformatorjev, pri teži posameznih šarž, pri vzdržnosti obzidave, pri časih izdelave šarž. V 60-tih letih je klasična elektroobložna peč dosegla zrelost jeklarskega agregata, v katerem je bilo mogoče gospodarno izdelati običajno nizkolegirano jeklo, kakor tudi najbolj zahtevno plemenito jeklo. Razvoj elektrojeklarstva v posameznih državah je bil posledaj odvisen predvsem od razpoložljivih cenjenih elektroenergetskih zmogljivosti ter od dejstva, ali razpolaga posamezna država s primernimi premogi za koksanje.

Kot je razvidno iz **tabele I**, se je delež elektrojekla v skupni proizvodnji jekla v letu 1985 najvišje povzpel v Španiji in Italiji, kjer presega 50 %. V svetovni proizvodnji pa je v istem letu delež elektrojekla dosegel 24,7 % in ima še vedno tendenco naraščanja.

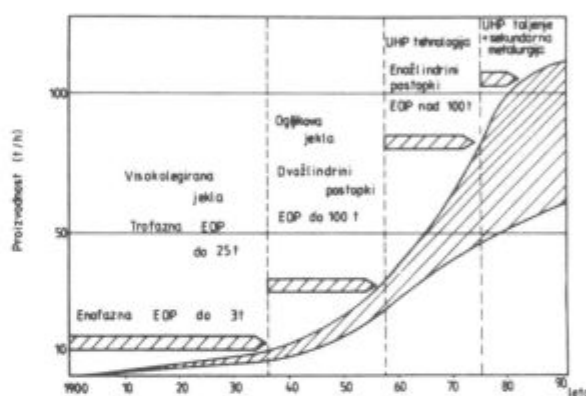
Tabela I: Proizvodnja elektrojekla in deleži v skupni proizvodnji jekla v posameznih državah za leto 1985

Država	10(6) t	%
Španija	8.70	58.5
Italija	12.52	52.5
Švedska	2.39	49.6
Anglija	4.54	28.9
Jugoslavija	1.15	26.1
Francija	3.68	19.6
Zvezna Republika Nemčija	7.48	18.5
Ves svet skupno	177.40	24.7

Trend rasti svetovne proizvodnje jekla je sicer za desetletno obdobje 1975—1985 komaj 0,3 %, za elektrojeklo pa še zmeraj znaša dobrih 4 %. Predvideva se, da je glede na 10-letno trajajoči recirkulacijski čas vložka oziroma sterega železa pričakovani največji možni mejni delež elektrojekla pri 30 % skupne proizvodnje jekla.

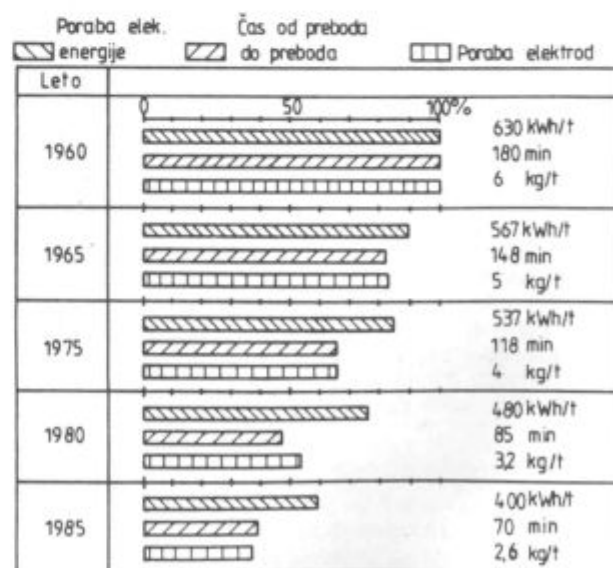
Do takega mesta v količinskem deležu proizvodnje se je elektroobložni peči uspelo prebiti z vrsto tehničnih in tehnoloških inovacij, med katere je v prvi vrsti šteti UHP tehniko. Ob koncu 60-tih let je namreč postalo jasno, da gradnja vedno večjih obložnih peči ne zagotavlja vedno ugodnih proizvodnih rezultatov; proizvodnost peči je direktno sorazmerna le moči pečnega transformatorja, zato so pričeli v ZDA po zamislih Schwabe-a graditi elektroobložne peči vedno večjih specifičnih moči, ki so se od prvotnih RP (Regular Power) vrednosti 200 kVA/t dvignile na preko 600 kVA/t (Ultra High Power) in omogočile čas raztalitve vložka pod 60 min. Povečevanje moči na obložni peči je bilo možno samo na račun povečevanja toka taljenja in s tem skrajšanja dolžine loka, kar je imelo za posledico izredno poslabšanje obratovalnega faznega faktorja ($\cos \varphi = 0,60$). Nova spoznanja o sevanju električnega loka na obzidavo — postavitev erozijskega indeksa — so potrjevala slabosti

nove UHP prakse, ki se je kazala predvsem v povečanih stroških za obzidavo peči kot neposredni posledici povečanih toplotnih obremenitev. Rešitev težav slabše vzdržnosti obzidave elektroobložne UHP peči je v 70-tih letih prišla iz Japonske z uvedbo vodnohlajenih sten — panelov — oziroma vodnohlajenega oboka. Z njimi je bilo mogoče brez težav obratovati tudi z največjimi močmi ob znosnih faznih faktorjih, tako v fazi taljenja kakor ob raztaljenem vložku, ko sedaj ni šlo le za vzdržnost obzidave, temveč samo še za porabo energije. Elektroobložni peči je zato ostala kot kritična tehnološka faza izdelave jekla, ki je zaradi svoje toplotnotehnične specifik in zahtev oksidacije, rafinacije in legiranja terjala v tem obdobju še vedno spremenjen način obratovanja v primerjavi s taljenjem. Šlo je predvsem za veliko znižanje moči v tem obdobju (na ca. 30 % moči taljenja) ter za dolgo trajajoče tehnološke postopke, ki so bili predvsem pri zahtevnih vrstah jekla še vedno daljši od faze taljenja. Uvedba sekundarnih metalurških postopkov, pri katerih se ves preostali tehnološki del, razen oksidacije in od-



Slika 2: Razvojne faze elektroobložne peči

Fig. 2: Development stages of the electric arc furnace



Slika 3: Razvoj glavnih kazalcev elektroobložne peči

Fig. 3: Development of influential parameters of the arc furnace

fosforjenja, izvrši izven elektroobločne peči, ter uvedba peneče žlindre, ki zakriva električni lok tudi pri raztaljenem vložku in omogoča intenzivno obratovanje z dolgim lokom v tem obdobju, sta povečali povprečno izkoriščenost moči pečnega transformatorja v času od izliva do izliva nad 75 % in povečali povprečni fazni faktor za to obdobje nad 0,80. Elektroobločna peč je tako postala talilni stroj izrednih zmogljivosti, ki se odlikuje predvsem z veliko prilagodljivostjo energijskih karakteristik, z izrednimi tehnološkimi možnostmi in veliko proizvodnostjo.

Na **Sl. 2** so prikazane štiri prelomne razvojne faze v razvoju elektroobločne peči, na podlagi katerih se je produktivnost tega agregata povzpela na več kot 100 t/h. Istočasno pa so se specifični materialni in energetski stroški zmanjševali, kot to kaže **Sl. 3**. Na podlagi dosevanih trendov lahko predvidevamo, da bo specifična poraba energije, poraba grafitnih elektrod in ognjevdržnega materiala v devetdesetih letih dosegla manj kot 40 % od vrednosti iz leta 1960.

ELEKTROENERGIJSKE KARAKTERISTIKE

Poraba električne energije za proizvodnjo jekla v elektroobločnih pečeh se v svetovni porabi električne energije nahaja na drugem mestu, takoj za porabo pri proizvodnji aluminija. Pri razvoju proizvodnje elektrojekla je bilo vedno prisotno ugodno razmerje specifične porabe električne energije v tem agregatu z ca. 600 kWh/t proti ca. 2000 kWh/t v nizkošahntni električni peči za pridobivanje grodlja oziroma z ca. 20000 kWh/t v elektrolizni peči za pridobivanje aluminija, kar je bistveno pripomoglo k ekonomičnosti njene proizvodnje. Tehnični problemi, ki so se pojavili s priključevanjem elektroobločnih peči na napajalno omrežje, niso bili le v izpolnjevanju zahteve po ravnotežju med vsakokratno porabo in proizvodnjo električne energije, temveč tudi v zadovoljevanju potrebnega kratkostičnega nivoja na mestu priklopa na javno napajalno omrežje (PCC — Point of Common Connection). Elektroobločna peč povzroča zaradi svojega nemirnega obratovanja v času taljenja, ko prihaja pod posameznimi elektrodami do občasnih kratkih stikov oziroma do trganja in ugasnitve loka, neenakomerne obremenitve omrežja, kar ima za posledico spremenljive padce napetosti in pojav utripanja svetlobe (flickerji) pri porabnikih, ki so na omrežje priključeni v bližini PCC. Na podlagi obsežne mednarodne raziskave, ki jo je opravila posebna komisija UIE, je ugotovljeno, da mora biti moč trofaznega kratkega stika v PCC med 60 in 80-kratno vrednostjo moči pečnega transformatorja oziroma, da mora biti razmerje moči kratkega stika napajalne mreže in kratkega stika obločne peči med 35 do 45. Ker se današnje kratkostične moči na 110 kV nivoju gibljejo med 2000 MVA in 3000 MVA, lahko ugotovimo, da leži pri tem zgornja meja moči pečnega transformatorja obločne peči pri 50 MVA oziroma da lahko brez posebnih ukrepov za povečanje kratkostične moči v napajalni točki priklompimo na 110 kV UHP-EOP največje zmogljivosti 80 t. Te ugotovitve izhajajo tudi iz predpisov posameznih evropskih držav o največjih dopustnih padcih napetosti, ki jih smejo povzročiti v PCC porabniki na 110 kV:

ob kratkem stiku EOP	dU max = 2,0—2,5 %
ob frekvenci 10 Hz	dU max = 0,5—1,0 %

S frekvenco 10 Hz ponavljajoče se obremenitve so posebej neprijetne zaradi tega, ker sovpadajo s področjem največje občutljivosti človeškega očesa za neprijetnost utripanja svetlobe. Elektroobločna peč pa ni zahteven porabnik za priklomp na električno omrežje le zaradi

visokih zahtev po čvrstosti napajalnega mesta, temveč povzroča onesnaženje napetosti tudi z višjeharmonskimi tokovi, ki nastajajo kot posledica nelinearne uporovne karakteristike električnega loka. Frekvenčne analize linijskih tokov obločnih peči kažejo prisotnost lihih in sodih višjeharmonskih komponent, kar govori ne samo o veliki popačenosti, temveč tudi o določenem usmerniškem efektu, ki ga ima električni lok v obločni peči. Pomembneje so prisotni vsi mnogokratniki tokov od drugega do trinajstega, njih spekter je odvisen predvsem od jonizacijskih pogojev gorenja loka: v začetku taljenja se posamezne vrednosti povzpnejo preko 30 % nazivnega toka, v obdobju raztaljenega vložka pa padejo te vrednosti pod 10 %. Zaradi takih obremenitev napajalnega omrežja se ustrezno popači sinusna oblika napetosti, ki se ji lahko priredi podoben spekter višjeharmonskih komponent.

Čeprav standardna nadomestna vezava električnih elementov obločne peči nadomešča električni lok le z delovno upornostjo, pa se v tem tokokrogu nahajajo tudi nadomestne induktivne upornosti omrežja, pečnega transformatorja ter visokotokovnih dovodov na peč. Manjše obločne peči imajo pred transformatorjem še dušilko, ki stabilizira nemirno obratovanje peči v času taljenja. Potreba po jalovih močeh je pri obratovanju peči zato neobhodna; njena velikost je odvisna od induktivne upornosti in od delovne točke na obratovalnem diagramu. Pri klasičnih elektroobločnih pečeh so bili v času taljenja fazni faktorji $\cos \varphi = 0,75$ do $0,85$, v času raztaljenega vložka pa okrog $0,70$. Standardna EOP UHP peč je v času taljenja imela fazni faktor $\cos \varphi = 0,62—0,72$ in se ta tudi v kasnejšem obdobju raztaljenega vložka ni kaj bistveno spremenil. Šele moderna UHP obločna peč, ki obratuje z dolgim električnim lokom, tako v času taljenja kot tudi po razstalitvi, omogoča doseganje povprečnega faznega faktorja nad $0,82$.

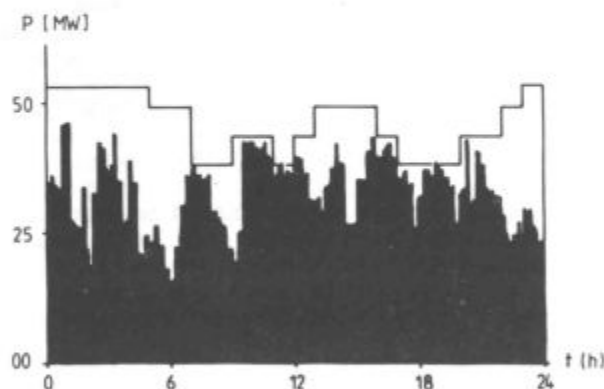
Elektroobločni peči pripadajo torej kompenzacijske naprave jalove moči, ki so v večini primerov kondenzatorske baterije, priključene na velikosti baterije primerne napetosti. Za obvladovanje v omrežju nastopajočih višjeharmonskih komponent se kompenzacijske naprave grade v obliki sesalnih krogov z resonančnimi napravami za 5, 7, 11, 13 komponento, ali pa celo z napravami za dinamično kompenziranje posameznih višjeharmonskih komponent, ki uravnovežujejo potrebe po jalovih močeh že znotraj časa nekaj deset milisekund. Take naprave bistveno znižujejo nihanja napetosti v PCC in zato virtualno zvišujejo kratkostični nivo priključnega mesta.

Nesimetrija faznih obremenitev, ki je nastajala zaradi nesimetrično oblikovanih dovodov na peč ali zaradi neustreznega delovanja elektrodnih regulatorjev, je posebno v začetnem obdobju uvajanja UHP povzročala s svojimi »vročimi« fazami probleme z vzdržnostjo obzidave kadi, peči in oboka. Napajalno omrežje takih nesimetrij običajno niti ne zapaža, saj so v večini primerov prehodne in omejene le na fazo taljenja oziroma se z vmesnimi transformacijami pri spojih transformatorjev D/y ta nesimetrija zmanjšuje. Moderne elektroobločne peči skoraj ne poznajo obremenitvenih nesimetrij, ki bi bile posledica nesimetrične gradnje visokotokovnih dovodov na peč, saj so ti dosledno triangulirani v vsem svojem poteku, od pečnega transformatorja do elektrod oziroma vložka v peči.

Analize dnevni in mesečni elektroenergetskih obremenitvenih diagramov obločnih peči kažejo njihovo značilno diskoniteto obratovanja, ki se odraža v ponavljajočem se zaporedju visokih obremenitev, ki jim sledi nižje obremenitve raztaljenega vložka, in končno ob izlivu šarže odklop peči od omrežja. Tudi znotraj ciklusa izde-

lave šarže prihaja v času od izliva do izliva ob ponovnem šaržiranju peči, ob delovanju preobremenitve zaščite ter ob drugih tehnološko pogojenih opravilih do izklopov obložne peči in do popolnih razbremenitev elektroenergetskega omrežja. Nadzorovanje odjema porabnikov električne energije, ki imajo v svoji sestavi poleg osnovne obremenitve tudi elektroobložne peči, je za racionalno izrabo električne moči nujno potrebno. Obračunska moč se v večini elektroenergetskih sistemov ugotavlja kot najvišja poraba električne energije v času 15 min v vsakem četrturnem intervalu trajanja tarifnega obdobja. Ker znaša delež stroškov za plačano moč v skupni ceni za električno energijo več kot 50 %, je vsako zniževanje moči odjema ob enaki energijski porabi istočasno zniževanje cene električne energije. Gospodarjenje z močjo porabe električne energije je eden od glavnih vplivnih dejavnikov stroškovne optimizacije pri proizvodnji jekla v obložnih pečeh. Gre prevsem za tak način vodenja proizvodnje, ki bo zagotavljal čim boljše zapolnitev obremenitvenega profila moči v teku dneva. Tolerančni profil moči, kot ga običajno predvidevajo pogodbe med odjemalci in dobaviteljem električne energije, je prirejen obremenitvenim karakteristikam proizvodnega elektroenergetskega sistema, in sicer tako, da vzpodbuja inverzno obratovanje porabnikov: v času visokih obremenitev v sistemu naj bi porabniki svojo moč zniževali, v času nizkih obremenitev v sistemu pa naj bi porabniki moč zviševali. Tarifne postavke za obračun električne energije v posameznem tarifnem obdobju (konična tarifa, višja tarifa, manjša tarifa) naj bi s svojimi cenovnimi razmerji vzpodbujale takšno porabo. Na **Sl. 4** imamo prikazan primer, kako se dejanska poraba električne energije neke železarne giblje v primerjavi z dopustno.

Razmerje med dejansko in dopustno porabo v določenem časovnem obdobju imenujemo faktor obremenitve ali tudi izkoristek odjema; giblje se med vrednostma 0,80—0,90. Višje vrednosti so običajne v dneh zimske sezone za čas trajanja konične tarife, nižje vrednosti pa za čas trajanja manjše tarife. Razlikovati je tudi med dnevnimi in mesečnimi vrednostmi izkoristkov odjema, pri čemer so mesečni izkoristki bistveno nižji, saj se v njih ne odražajo samo nižje obremenitve ob sobotah in nedeljah, ampak tudi vsi enkratni mesečni tehnološki zastoji. Če izhajamo iz celotne letne porabe električne energije ter iz najvišje plačane mesečne konice četrturne moči, lahko namesto izkoristka časa govorimo o le-



Slika 4:
Dejanska poraba električne energije znotraj dovoljene moči odjema

Fig. 4:

Actual electric energy consumption inside the limits of allowed power consumption

tnih obratovalnih urah. Za železarne, ki imajo v svojem sklopu elektroobložne peči, veljajo za normalne letne obratovalne ure med 5500 h in 6500 h.

Za presojo elastičnosti moči odjema posamezne železarne kot porabnika električne energije je pomembno poznati osnovno — neprilagodljivo moč ter tej nadgrajeno prilagodljivo moč odjema. Slednja se nanaša predvsem na moč elektroobložnih peči, saj se njihova prilagodljivost kaže v tem, da je tako peč mogoče ustaviti brez večjih tehnoloških posledic sredi tehnološkega procesa: v času taljenja za nekaj deset minut, v času raztaljenega vložka za nekaj minut. Pred vakokratnim pričetkom nove šarže pa prekinitve obratovanja lahko traja tudi več ur oziroma z predhodnimi organizacijskimi uskladitvami več dni. Zaradi opisanih možnosti prilagajanja porabe električne energije možnostim dobave lahko taki porabniki nastopajo v elektroenergetskem sistemu kot rezerva moči. Take možnosti poseganja v tehnološki proces omogočajo računalniško vodenje moči energetskega sistema železarne neposredno „on line“. Merijo se porabe električne energije posameznih peči in skupna poraba železarne, ugotavljajo se tehnološke faze po pečeh, primerjajo se dejanski trendi porabe s predvidenimi v vsakem četrturnem obdobju tolerančnega obremenitvenega profila, na podlagi spoznanega modela in v program vstavljenih parametrov se nato znižajo potrebne obremenitve ali popolnoma prekine obratovanje peči z direktnim posegom računalnika v regulatorje moči obložnih peči.

Opisano delovanje sistema vodenja, imenovano tudi Power Management, zahteva vnaprej poznano tolerančni profil; postavlja se vprašanje določitve optimalnega nivoja moči kot ravnotežja med stroški za plačano angažirano električno moč in stroški za zastoje v proizvodnji jekla. Ekonomski vpliv na celotno predelovalno verigo jekla je mogoče neposredno ugotavljati le s časovno odvisnimi parametri, ki ponazarjajo efekte medfaznih zalog.

ENERGIJSKE KARAKTERISTIKE

Energijske razmere elektroobložne peči za čas od preboda do preboda najbolje prikazuje Sanky-jev diagram na **Sl. 5**, kjer pomeni:

dovedena energija: W_e (kWh/t)	električna energija, merjena na pečnem transformatorju
W_{re} (kWh/t)	sproščena reakcijska toplota
W_g (kWh/t)	toplota iz goriva predgrevanja
W_{rek} (kWh/t)	rekuperacijska toplota
porabljena energija: W_o (kWh/t)	entalpija jekla
$W_{\dot{z}}$ (kWh/t)	entalpija žilindre
W_{izg} (kWh/t)	toplotne izgube

Če si izračunamo karakteristične deleže iz zgoraj prikazanih vrednosti, dobimo:

R_{re} : razmerje med sproščeno reakcijsko toploto in entalpijo jekla;

R_{izg} : razmerje med toplotnimi izgubami in entalpijo jekla;

$R_{\dot{z}}$: razmerje med entalpijo žilindre in entalpijo jekla;

R_{enel} : razmerje med entalpijo jekla in žilindre ter elektr. energ.;

R_{ter} : razmerje med entalpijo jekla in žilindre ter celotno dovedeno energijo.

V **tabeli II** zbrani podatki za RP (klasična peč) in UHP (močnostna peč) kažejo na značilne razlike oziroma vrednosti.

Tabela II: Karakteristične toplotnotehnične vrednosti obložne peči

Delež	RR EOP	UHP EOP
R _{re}	0,30—0,35	0,55—0,75
R _{izg}	0,70—1,30	0,65—0,90
R _ž	0,15—0,25	0,10—0,20
R _{enel}	0,55—0,75	0,85—1,00
R _{ter}	0,50—0,60	0,60—0,65

Iz podanih toplotnotehničnih vrednosti, dobljenih iz energijskih bilanc več kot 50 elektroobložnih peči, lahko zaključimo:

- da se v modernih UHP EOP bistveno povečuje delež rekacijske toplote v entalpiji jekla, kot posledica intenzificirane porabe kisika v peči oziroma uporabe dodatnih energijskih nosilcev;
- da se delež toplotnih izgub z moderno tehnologijo kratkih izdelovalnih časov zmanjšuje kljub uvedbi vodnohlajenih sten in vodnohlajenih obokov;
- da se delež toplotnih izgub z moderno tehnologijo izdelave jekla zmanjšuje;
- da se delež električne energije v entalpiji jekla povečuje: moderna UHP peč dosega več kot 100 % izrabo električne energije, kar pomeni, da pokrivamo z drugimi energijskimi nosilci vse toplotne izgube EOP in še del potrebne entalpije jekla oziroma žlindre;
- da se pri modrnih pečnih agregatih izboljšuje njihov termični izkoristek, zaradi boljših ognjevzdržnih in izolacijskih materialov, kakor tudi kratkih izdelovalnih časov.

Pri računanju energijskih bilanc elektroobložne peči se uporabljajo naslednje vrednosti karakterističnih fizikalnih veličin:

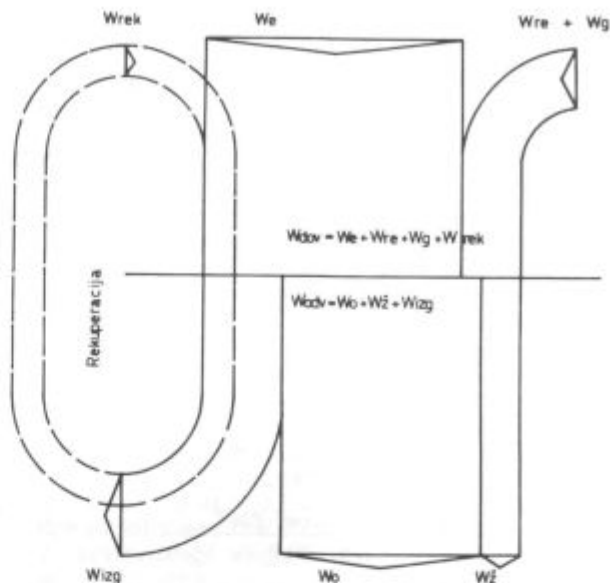
— specifična toplota vložka za segrevanje od 20 ^o C na 1525 ^o C	298 kWh/t
— specifična talilna toplota	56 kWh/t
— specifična toplota taline za segrevanje od 1525 ^o C na 1550 ^o C	6 kWh/t
Skupaj	360 kWh/t

Specifična toplota žlindre se glede na 1600^oC in na različno sestavo giblje med 550 kWh/t in 630 kWh/t.

Energijske bilance elektroobložnih peči različnih avtorjev kažejo, da je vsota eksotermnih reakcij (oksidacija C, Si, Mn, Cr, Al, Fe, P, S) in endotermnih reakcij (disociacija FeSi, CaCO₃, MgCO₃) vedno pozitivna. Ker ima največji vpliv na rezultat bilance oksidacija ogljika, se energijski vpliv ogljika v elektroobložni peči enostavno ugotavlja s količino v peč vpihanega kisika. Z upoštevanjem entalpije dimnih plinov pri 1000^oC nam oksidacija ogljika da:



Razmerje CO/CO₂ je odvisno od ravnotežja teh plinov s Fe in Fe oksidi, ki vlada pri določeni temperaturi v peči, zato se računa s srednjo energijsko vrednostjo 1 m³ kisika 3 kWh. Pri količini kisika, ki se v teku izdelave šarže porabi v peči (15 m³/t—30 m³/t), pomeni to energijsko vrednost od 50 kWh/t do 100 kWh/t. S povečevanjem količine vpihanega kisika raste tudi potreba po ogljiku, ki se ga zato dodaja v peč. Ker razogljichenje taline poteka z burno reakcijo, omejuje kipeenje taline hi-



Slika 5:

Sanky-jev diagram energijskih tokov v obložni peči

Fig. 5:

Sanky's diagram of energy flows in the arc furnace

trost zgorevanja ogljika na 40 kg/m²h. Tako nastala kipeča žliindra zaslanja električni lok in zelo ugodno vpliva na toplotne razmere v obložni peči.

Čenen zemeljski plin je prodril v obložno peč kot dodatni energijski nosilec, tako zaradi ekonomskih kot tehnoloških prednosti. Zgorevanje plina s pomočjo visokohitrostnih oxy-fuel gorilnikov je posebno v začetni fazi taljenja ugodno, ker pomaga raztaliti vložek v conah med elektrodami in tako pripomore k hitremu zaključku taljenja. Ob koncu taljenja pa izkoristek takega segrevanja zaradi visokih temperatur v peči zelo pade, zato se uporablja izključno le v začetku taljenja. Energijsko pomeni 1 m³ zemeljskega plina ca. 6 kWh. Izkustveni podatki govorijo o skrajšanju taljenja zaradi uporabe zemeljskega plina v obložni peči do 10 % časa taljenja.

Predgrevanje vložka izven elektroobložne peči je razširjeno predvsem v deželah severne Evrope, ker zagotavlja sušenje vložka. Vedno dražji zemeljski plin pri tem skušamo nadomestiti s toploto plinov, izhajajočih iz peči. Naprave za tako izkoriščanje odpadne toplote so investicijsko in prostorsko zahtevne, doseženi efekti govore o vrnjeni toplotni vrednosti med 30 kWh/t in 50 kWh/t, maksimalna dosežena vrednost pa je 80 kWh/t.

Glede na teoretsko potrebno specifično energijo, ki jo je potrebno dovesti v vložek v peči, da se ta raztali in segreje na zahtevano temperaturo, lahko ugotovimo ustrezno moč pečnega transformatorja:

$$P_{nt} = \frac{1,1 \cdot W_o \cdot n_o \cdot T_v}{n_t \cdot n_{el} \cdot \cos \varphi \cdot t \cdot t} \text{ [kVA]},$$

kjer so:

- | | | |
|------------------------|-----------------------------------------|----------------------------|
| W _o (kWh/t) | — specifična energija | W _o = 360 kWh/t |
| n _o | — delež električne energije | n _o = 0,80 |
| n _t | — toplotni izkoristek v času taljenja | n _t = 0,71 |
| n _{el} | — električni izkoristek v času taljenja | n _{el} = 0,86 |
| cos φ t | — fazni faktor taljenja | cos φ t = 0,83 |
| T _v (t) | — teža vložka | |

Tt(h) — čas taljenja
Pnt (kVA) — nazivna moč pečnega transformatorja

Ob upoštevanju običajnih vrednosti se zgornja enačba poenostavi:

$$P_{nt} = \frac{625}{tt} \text{ [kVA/t]}$$

kar pomeni, da nam specifična moč pečnega transformatorja 625 kVA/t da čas raztalitve 1 uro; v tem primeru torej lahko govorimo o enourni UHP peči. Razpon elektroobložnih peči se glede na specifično moč širi od 200 kVA/t do 1000 kVA/t, kar ustreza časom taljenja med 3,5 uro in 40 min.

Podrobnejša raziskava toplotnega izkoristka obložne peči v času taljenja se naslanja na raziskave več kot 100 obložnih peči v Evropi; upošteva zakonitosti geometrijske rasti velikosti elektroobložne peči, dobimo za toplotni izkoristek naslednji izraz:

$$\eta_{taen} = \frac{nel \cdot Wo}{Wo + 82,8 \cdot Tv^{-0,4} \cdot tt}$$

Rezultati, ki jih dobimo s pomočjo navedenega izraza, so prikazani v tabeli III.

Tabela III: Toplotni izkoristki elektroobložne peči v času taljenja ($\eta_{tael} = 0,859$)

EOP	1 h	2 h	3 h
(t)	η_{taen} (kWh/t)	η_{taen} (kWh/t)	η_{taen} (kWh/t)
10	0,787 (458)	0,726 (496)	0,674 (534)
30	0,811 (444)	0,768 (469)	0,730 (493)
50	0,820 (439)	0,784 (459)	0,751 (480)
70	0,824 (437)	0,792 (455)	0,763 (472)
90	0,828 (435)	0,798 (451)	0,771 (467)
110	0,830 (434)	0,803 (449)	0,777 (463)

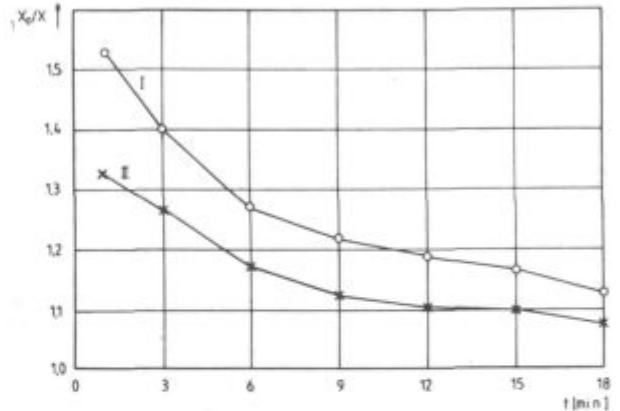
Za določitev elektroenergetskih parametrov pri taljenju so najvažnejše induktivne in ohmske upornosti pečnega tokokroga, ugotovljene z meritvijo kratkega stika peči. Te niso vplivno odvisne od zakonov geometrijske rasti obložne peči; karakteristične vrednosti induktivnih upornosti so:

- pri obložnih pečeh 5 t—10 t $X = 3,5\text{—}5,5$ mohm
- pri obložnih pečeh 25 t—100 t $X = 2,5\text{—}3,5$ mohm

Pri tem se razmerja med induktivno in ohmsko upornostjo gibljejo med vrednostmi 3 do 10; vse navedene vrednosti so reducirane na sekundarno stran pečnega transformatorja in upoštevajo tudi upornosti napajalne mreže.

TALJENJE V REALNIH RAZMERAH

V elektroobložni peči nastajajo v času taljenja posebne razmere, ki so posledica slabših jonizacijskih pogojev pri gorenju loka. Zdi se, kot da so se v elektroenergetskem krogu peči kot posledica nesinusnih oblik elektrodnih tokov in napetosti povečale njihove nadomestne induktivne in ohmske upornosti, zato govorimo o obratovnih vrednostih teh upornosti, oziroma o razmerju med obratovno in kratkostično induktivno upornostjo. Na sl. 6 imamo prikazan značilen primer, kjer se vidi, kako to razmerje v začetku taljenja vsake posamezne košare naraste (od cca 1,30) in se nato s stopnjo raztalitve zmanjšuje na končno vrednost (na ca. 1,057). Pri ugot-



Slika 6:

Razmerje med obratovno in kratkostično induktivno upornostjo elektroobložne peči

Fig. 6:

Relationship between the operational and the short-circuit inductive resistance of the electric arc furnace

vljanju potreb po najvišji napetosti taljenja je zato potrebno upoštevati obratovno induktivno upornost, navidezno moč taljenja in fazni faktor taljenja, kot sledi:

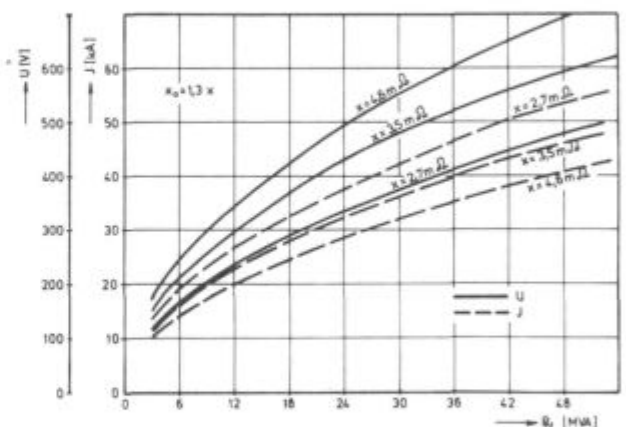
$$U = \sqrt{\frac{P_{nt} \cdot X_0}{\sin \varphi}} \text{ [V]}$$

Razmerje med največjo in najmanjšo napetostjo je odvisno predvsem od potrebne moči za vzdrževanje končne temperature v peči in je izkustveno 3 : 1.

Pripadajoči tok taljenja je:

$$J = \sqrt{\frac{P_{nt} \cdot \sin \varphi}{3 \cdot X_0}} \text{ [A]}$$

Maksimalne vrednosti napetosti in tokov taljenja za različne moči pečnih transformatorjev so prikazane na sl. 7. Vrednosti so računane za fazni faktor $\cos \varphi = 0,707$, kjer dobimo najnižjo napetost taljenja.

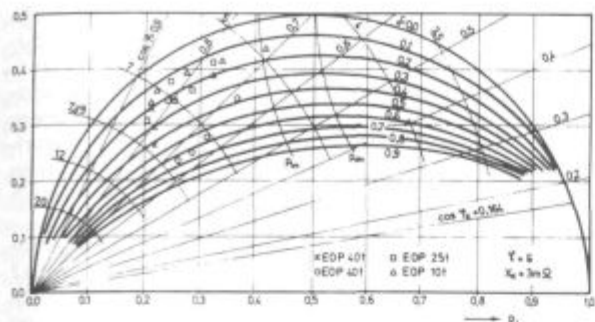


Slika 7:

Maksimalne vrednosti napetosti in tokov taljenja elektroobložne peči

Fig. 7:

Maximal values of voltages and of currents during melting in the arc furnace

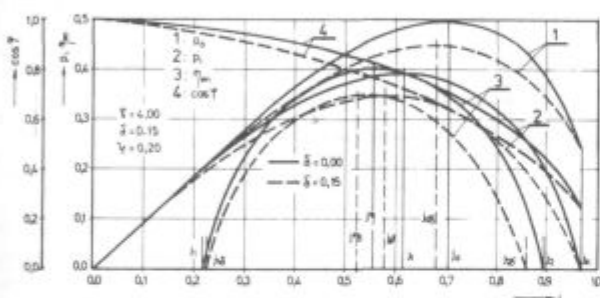


Slika 8:

Realen krožni diagram elektroobložne peči

Fig. 8:

Real circle diagram of the electric arc furnace



Slika 9:

Realen obratovalni diagram elektroobložne peči

Fig. 9:

Real diagram of the arc-furnace operation

Zaradi opisanega navideznega povečevanja obratovne induktivne upornosti se ob nespremenjeni napetosti taljenja znižuje delovna moč taljenja oziroma se znižuje obratovalni fazni faktor, kot to kaže realni krožni diagram na sl. 8 oziroma realni obratovalni diagram na sl. 9.

Kot je razvidno iz dosedanjih izvajanj, nam časa taljenja ne skrajšuje samo močnejši pečni transformator ali njegovo čimvišje preobremenjevanje oziroma optimalno nastavljen elektroodna regulacija, ki naj po vsaki motnji v čim krajšem času izravna moč taljenja na nastavljeno vrednost, ali optimalno izbran vložek, ki omogoča, da se na dnu peči ustvari dovolj velika luža taline, ki zagotavlja večjo enakomernost obratovanja peči, temveč tudi srednji $\cos \varphi$ v času taljenja. Z njim je namreč pri določeni obratovalni upornosti definirano obratovalno mesto na krožnem oziroma obratovalnem diagramu obložne peči. Vsako povečanje faznega faktorja v času taljenja pomeni povečanje specifične moči taljenja ob nespremenjeni moči transformatorja, vendar pa tu jasne elektroenergetske zahteve zadenejo ob konstrukcijske in tehnološke omejitve.

Fazni faktor nad 0,86 povzroča nestabilno gorenje električnega loka: lok v vsaki polperiodi ugasne, ker je ob prehodu toka skozi nič vsakokratna vrednost sinusne napetosti nižja od vžigne napetosti loka. Visok $\cos \varphi$ pomeni tudi dolg električni lok, kar je drugi vzrok nestabilnega obratovanja, saj so pri tem jonizacijski pogoji za gorenje loka slabi; lok ob najmanjši spremembi ugasne; da pa se ponovno prižge, mora elektroda prepotovati več cm, kar pomeni izgubljen čas, prekinjeno obratovanje ene elektrode pa se posredno odraža tudi pri zmanjšanju moči na preostalih dveh elektrodah. Govorimo o

nemirnem obratovanju peči v času taljenja, kar vpliva na zmanjšanje povprečne moči taljenja. Taljenje z dolgim lokom je zato možno le v drugih treh četrtinah časa taljenja ob pogoju, da je lok zakrit z vložkom. Z erozijskim indeksom definirana toplotna obremenitev obzidave dosega svoje najvišje vrednosti pri faznih faktorjih 0,82 do 0,86, zato so klasične UHP peči s standardno obzidavo smeje obratovati z nazivnimi elektroodnimi tokovi le pri $\cos \varphi = 0,58-0,64$ oziroma je bil iztek taljenja z nezakritim lokom pri običajnih pečeh najbolj problematična faza taljenja. Šele sodobne močnostne peči, ki so opremljene tako z vodno hlajenimi stenami kot tudi z vodno hlajenim obokom, morejo obratovati brez težav s faznimi faktorji med 0,80 in 0,84. Posebna tehnologija taljenja s preostankom taline omogoča ugodne efekte taljenja s dolgim lokom: po tem, ko so elektrode prodrle v vložek oziroma do preostale taline na dnu peči, se vložek tali od spodaj navzgor s polno močjo in z veliko stabilnostjo. Pri uporabi peneče žindre je mogoče obratovati z dolgim lokom tudi v fazi raztaljenega vložka, kar zagotavlja tudi tej fazi ugodne toplotnotehnične razmere.

Iz obratovalnega diagrama na sl. 9 je razvidno, da obstaja obratovanje, kjer dosežemo najhitrejšo raztalitev (največja moč na loku j_l), kakor tudi obratovanje, kjer raztalimo vložek z najmanj električne energije (največji energijski izkoristek j_n). Elektroodni tokovi se pri teh obratovalnih mestih med seboj razlikujejo za idealne razmere v peči, kakor tudi za realna stanja. Najenostavneje jih je mogoče definirati s pripadajočim $\cos \varphi$. Izračunan primer konkretnih razmerij takih stanj je prikazan v tabeli IV.

Tabela IV: Ekstremne vrednosti moči na loku in energijskega izkoristka ter pripadajoči elektrotehnični parametri

	Maksimalna moč loka		Maksim. energ. izkoristek	
	Ideal.	Real.	Ideal.	Real.
Relat. tok	0,646	0,610	0,424	0,406
$\cos \varphi$	0,763	0,713	0,906	0,851
Relat. del. moč	0,493	0,435	0,384	0,346
Rel. moč loka	0,424	0,372	0,354	0,318
Rel. el. izgube	0,070	0,062	0,030	0,027
Energ. izkorist.	0,764	0,749	0,922	0,921
Izkorist. časa	1,000	1,000	0,814	0,834

V navedeni tabeli se relativne vrednosti toka nanašajo na tok idealnega kratkega stika, relativne vrednosti moči pa na moč idealnega kratkega stika. Energijski izkoristek upošteva električne in toplotne izgube, časovni izkoristek pa izrabo moči glede na maksimalno moč loka.

Prave vrednosti tokov in moči taljenja so odvisne tako od napetosti taljenja kakor od induktivnih upornosti celotnega tokokroga peči; vsaki napetostni stopnji lahko privedemo obratovalno stanje največje delovne moči na loku oziroma obratovalno stanje z največjim energijskim izkoristkom peči. Če ležijo ta stanja nad dovoljeno močjo pečnega transformatorja, tako obratovanje ni možno; v tem primeru je potrebno znižati talilno napetost in obratovati s tako dolgim lokom, kot je še dopustno glede na stabilnost taljenja. Za doseglo najkrajšega taljenja je važna višina vsakokratne moči loka kakor tudi njena dosežena povprečna vrednost. Šele po izboru najprimernejše talilne napetosti se odpre vprašanje pravilne namestitve taličnega toka.

Iz tabele IV se da razbrati, da bomo s taljenjem pri toku $j = 0,406$ ($\cos \varphi = 0,851$) dosegli sicer največji energijski učinek, vendar pa bo zaradi nižje moči, ki ga tako obratovanje zahteva, trajalo taljenje 12 % dalj od taljenja

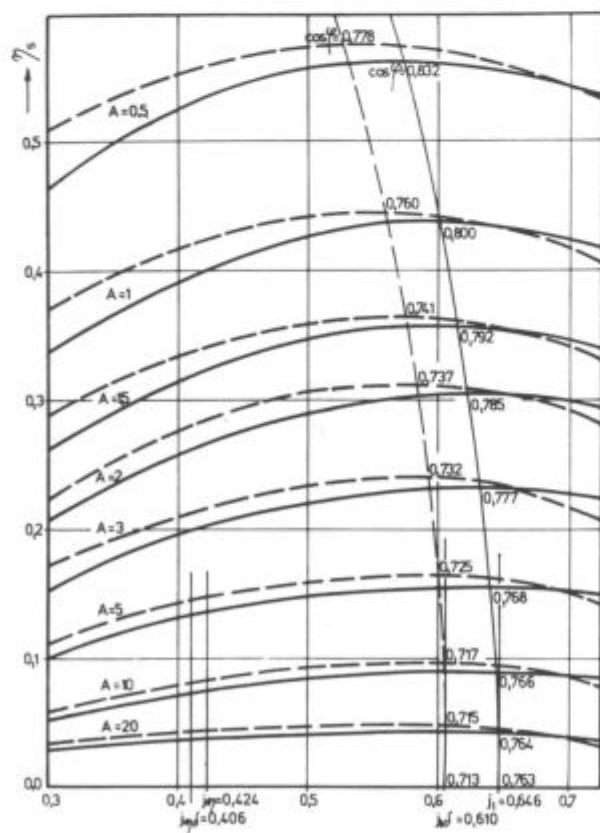
pri največji moči na loku. Pri maksimalni moči na loku $j=0,610$ ($\cos \varphi = 0,713$) pa bo energijski učinek 4,7 % slabši od maksimalnega. Očitno je, da leži optimalno taljenje nekje med obema vrednostma, določa ga najnižja skupna vrednost stroškov za porabljeno energijo in stalnih (kapitalnih) stroškov za porabljen čas pri taljenju oziroma razmerje teh stroškov s stroški za teoretsko specifično porabo električne energije.

TALJENJE Z NAJNIŽJIMI STROŠKI

Poglobljena analiza optimalnega obratovanja (taljenja) mora poleg elektroenergijskih in vseh fiksnih stroškov upoštevati še one, na katere lahko z načinom obratovanja vplivamo: to so predvsem stroški obzidave in stroški za porabo grafitnih elektrod. V tabeli V je prikazana karakteristična sestava navedenih stroškov, kot nastopajo pri proizvodnji jekla v domačih in zahodnoevropskih razmerah.

Tabela V: Deleži stroškov pri proizvodnji jekla

	SRS	BRD
1. Stroški električne energije	35 %	50 %
2. Kapitalni-fiksni stroški	10 %	15 %
3. Stroški ognjestalnega materiala	10 %	5 %
4. Stroški grafitnih elektrod	45 %	30 %
	100 %	100 %



Slika 10:

Relativni energijski stroški v času taljenja elektroobložne peči

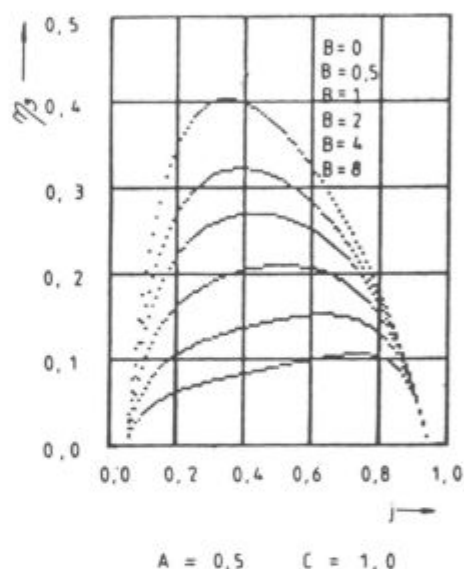
Fig. 10:

Relative energy costs during melting in the electric arc furnace

Glede stroškov ognjevarnega materiala v elektroobložni peči lahko po splošno uveljavljeni metodi računamo, da so ti sorazmerni toplotni obremenitvi obzidave, izraženi z erozijskim indeksom. Če vpliv različnih izdelovalnih tehnologij upoštevamo s korekcijskim faktorjem ter vpeljemo razmerje s stroški teoretske porabe električne energije, je delež stroškov obzidave sorazmeren razmerju vsakokratnega erozijskega indeksa z njegovo maksimalno vrednostjo.

Podobno lahko tudi za stroške porabe elektrod ugotovljamo njihov delež v elektroenergijskih stroških. Delež je predvsem v fazi taljenja sorazmeren kvadratu toka taljenja; ker menimo, da dobimo najkrajše taljenje pri obratovanju s tokom, ki zagotavlja maksimalno moč na loku, računamo pri optimiranju stroškov z ustreznim razmerjem dejanskega toka proti toku maksimalne moči na loku.

S sl. 10 je vidno, kako prikazano razmerje (A) vpliva na spremembo stroškovno optimalnega toka: nizko raz-



Slika 11:

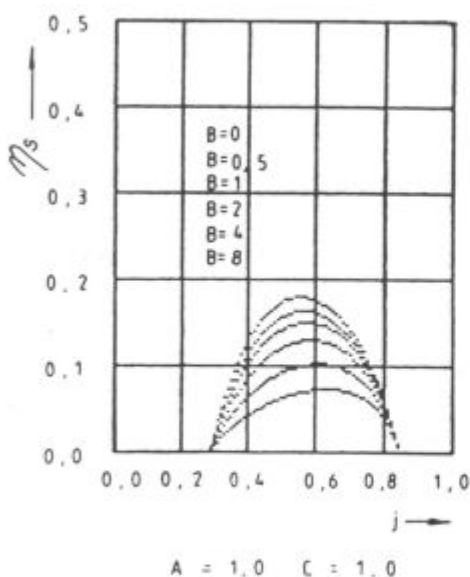
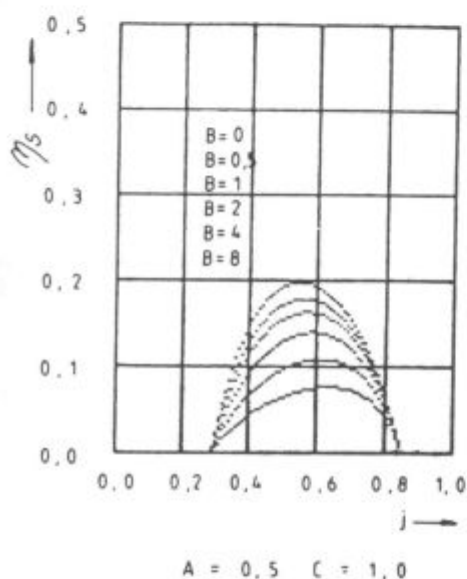
Relativni energijski stroški ob začetku taljenja

Fig. 11:

Relative energy costs at the beginning of melting

merje stroškov (A) pomeni visoke energijske stroške v primerjavi s stroški proizvodne kapacitete, zato leži optimum le nekaj nad obratovanjem, kjer dobimo največji energijski izkoristek; visoko razmerje stroškov (A), ki pomeni visok strošek kapitala v primerjavi s stroški električne energije, pa premika optimum proti obratovalnemu mestu, kjer dosegamo največjo električno moč na loku. Relativni elektroenergijski strošek (n_s) označujemo kot delež teoretskih elektroenergijskih stroškov v skupnih stroških pretalitse. Najnižji skupni stroški nastopajo torej takrat, ko doseže relativni elektroenergijski strošek svojo maksimalno vrednost.

Rezultate računalniškega iskanja stroškovnega obratovalnega optimuma, ki upošteva vse štiri nastopajoče stroškovne zakonitosti, kaže skupina diagramov na sl. 11, kjer so prikazane razmere na začetku taljenja, in na sl. 12, kjer so prikazane razmere ob koncu taljenja.



Slika 12:

Relativni energijski stroški ob koncu taljenja

Fig. 12:

Relative energy costs at the end of melting

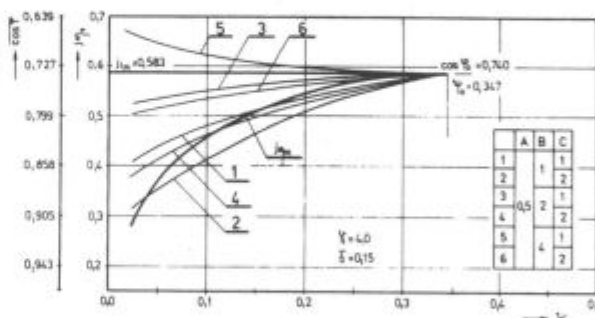
Pri tem pomeni B razmerje stroškov obzidave proti stroškom teoretske porabe električne energije, C pa razmerje stroškov porabe grafitnih elektrod proti stroškom teoretske porabe električne energije.

Kot je razvidno iz zgornjih slik, nastopa bistvena razlika pri stroškovno optimalnem taljenju med začetkom oziroma koncem taljenja. Razlike nastajajo zaradi velike popačitve sinusnih vrednosti tokov v začetku taljenja, kar se odraža v povečani obratovalni induktivnosti, kakor tudi v majhnih toplotnih izgubah in nizkih vrednostih za razmerje B, kot posledica velike zaslonitve loka z vložkom.

Konec taljenja označujejo: velike toplotne izgube, manjše povečanje obratovalne induktivne upornosti in večje vrednosti stroškov ognjevzdržnega materiala. S slikovnega prikaza lahko razberemo, da zahtevajo visoki stroški za obzidavo (klasična UHP EOP) optimalno obratovanje z visokimi tokovi oziroma nizkimi $\cos \varphi$; da pa nizki stroški obzidave (vodno hlajeni paneli) omogočajo doseganje najnižjih stroškov z obratovanjem pri daljšem loku, t. j. pri $\cos \varphi > 0,80$.

Na sl. 13 so prikazane optimalne vrednosti toka ($\cos \varphi$) pri stroškovnem optimiranju za različna, v praksi nastopajoča stroškovna razmerja A, B, C v odvisnosti od toplotnih izgub. Vidimo, da večina stroškovno optimalnih vrednosti leži med obratovalnimi mesti maksimalne moči na loku in maksimalnega energijskega izkoristka. Izredno veliki stroški za porabo elektrod lahko npr. premaknejo stroškovni optimum preko toka maksimalnih energijskih izkoristkov k višjim $\cos \varphi$, med tem pa lahko izredno visoki stroški za ognjevarno obzidavo zahtevajo premik k obratovanju pod $\cos \varphi < 0,700$. V splošnem velja, da zahtevajo naraščajoče toplotne izgube obratovalni premik k maksimalni moči loka, ne glede na veljavna stroškovna razmerja. Iz povedanega je mogoče ugotoviti, da poteka taljenje vložka v elektroobložni peči v spremenljivih pogojih. Za stroškovno optimalno vodenje taljenja je bistveno, kako se posamezni vplivni dejavniki časovno spreminjajo oziroma kako so odvisni od stopnje gotovosti tehnološkega procesa. Da obratovalna induktivna upornost s časom taljenja pada, potrjujejo rezultati opravljenih meritev; linearno naraščajočo odvisnost lahko predpostavimo tudi za stroške obzidave. Največ negotovosti je pri ocenjevanju časovnega poteka toplotnih izgub: v splošnem lahko trdimo, da toplotne izgube s stopnjo raztaljenosti vložka rastejo.

Teorija energijskih in stroškovnih obračunov v času taljenja omogoča vrednotenje različnih scenarijev talje-



Slika 13:

Stroškovno optimalne vrednosti relativnih tokov in pripadajočih $\cos \varphi$.

Fig. 13:

Optimal-cost values of relative currents and corresponding $\cos \varphi$

nja. Numerična integracija vseh časovno spremenljivih parametrov daje:

- potreben čas taljenja,
- srednje relativne energijske izgube,
- srednje deleže stroškov za ognjevdzdržen material, za porabo grafitnih elektrod in fiksnih stroškov,
- vsakokratno stroškovno optimalno vrednost toka taljenja oziroma pripadajočega $\cos \varphi$.

Primerjava med stroškovno optimalnimi procesi in klasičnimi načini taljenja (konstanten tok, linearno ali časovno koračno spreminjanje toka) kaže, poleg tega da je

stroškovno optimirano taljenje najcenejše taljenje, da pri klasičnem taljenju na dolžino taljenja ne vplivajo stroškovna razmerja: dolžina talilnega procesa je določena s potrebno razliko med dovedeno energijo in energijo izgub. Stroškovno optimiranje pa zahteva vsakokratnemu stanju stroškovnih in energijskih parametrov ustrezno dovajanje energije, zato neposredno vpliva tudi na trajanje taljenja. V tabeli VI so zbrani časi taljenja in začetne ter končne vrednosti faznih faktorjev za nekaj značilnih primerov cenovnih razmerij. Vrednosti so dobljene na podlagi predpostavljenih linearnih zakonitosti spreminjanja vplivnih parametrov.

Tabela VI: Časi taljenja ter začetne in končne vrednosti $\cos \varphi$ stroškovne optimizacije

A	B	C = 1,0			C = 2,0			C = 4,0		
		tt (h)	cos φ z	cos φ k	tt (h)	cos φ z	cos φ k	tt (h)	cos φ z	cos φ k
0,5	1,0	0,847	0,936	0,850	0,946	0,954	0,878	1,103	0,969	0,901
	2,0	0,816	0,936	0,818	0,901	0,954	0,854	1,048	0,969	0,891
1,0	1,0	0,809	0,915	0,838	0,874	0,936	0,871	0,996	0,956	0,899
	2,0	0,786	0,915	0,822	0,849	0,936	0,849	0,968	0,956	0,885

Dobljeni rezultati kažejo:

- da se za začetek taljenja zahtevajo skoraj nedosegljivo visoki fazni faktorji,
- da fazni faktorji s stopnjo raztalitve vložka padajo in so ob koncu taljenja najnižji,
- da vsa ona cenovna razmerja, ki zahtevajo nižje vrednosti stroškovno optimiranih tokov taljenja, podaljšujejo čas pretaljevanja.

Kolikšni so relativni prihranki stroškovnega optimiranja, nam pove elastičnost funkcije skupnih stroškov v bližini njene ekstremne vrednosti. Če predpostavimo 10 % odstopanje toka taljenja od njegove optimalne vrednosti, velja za začetek taljenja, da je stroškovno optimalno vodenje procesa ca. 0,5 % cenejše, ob koncu taljenja pa nam stroškovno optimalno vodenje lahko prinese več kot 10 % prihranka.

MOŽNA PROIZVODNJA

Pri obravnavanju možne proizvodnje elektroobložne peči je potrebno upoštevati izdelovalni čas šarže t. j. čas za raztalitev vložka in čas, ki ga zahteva tehnologija izdelave določene kvalitete jekla do izliva šarže, kakor tudi vse ostale manipulacijske »mrtve« čase. Torej velja:

$$t\dot{s} = tt + to$$

pri čemer je

$$to = tr + tm$$

in so:

tš (h) — čas šarže

tt (h) — čas taljenja

to (h) — ostali izdelovalni čas

tr (h) — čas rafinacije

tm (h) — čas manipulacij

Proizvodnja jekla v elektroobložni peči je diskontinuirani proizvodni postopek, ki ga prekinjajo številni predvidljivi in nepredvidljivi dogodki. Tako lahko predvidimo:

- generalno popravilo ognjevdzdržne obzidave in zamenjavo oboka peči,
- zamenjavo oziroma podaljšanje grafitnih elektrod,
- planirana vzdrževalna dela pri strojnih in elektrotehniških napravah.

Nepredvidljivi dogodki pa so:

- sprotne popravila ognjevdzdržne obzidave,
- strojniška in elektrotehniška vzdrževalna opravila,
- čakanje zaradi nepredvidljivih zastojev v pretoku materiala in energije.

Iz dnevnih, mesečnih in letnih koledarskih delovnih ur zato ne moremo določiti povprečnega trajanja ene šarže, ne da bi pri tem upoštevali ustrezno izrabo časa, s katero upoštevamo za proizvodnjo izgubljene čase. Faktor izrabe časa je definiran:

$$\eta_i = 1 - \frac{tp}{N \cdot t\dot{s}} - \frac{tv + t\dot{c}}{t\dot{s}}$$

pri čemer je:

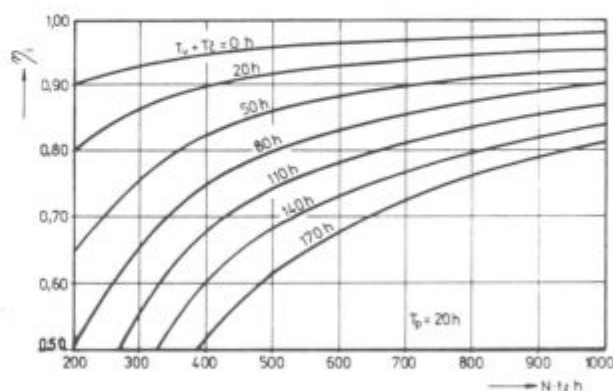
tp (h) — čas za obnovo obzidave

N — število šarž med dvema obnovama obzidave

tv (h) — čas vzdrževalnih opravil v obdobju ene šarže

tċ (h) — čas čakanja v obdobju ene šarže

Na sl. 14 je prikazana izraba časa pri proizvodnji jekla v obložni peči v odvisnosti od števila obratovnih ur



Slika 14:

Faktor izrabe časa pri proizvodnji jekla v obložni peči

Fig. 14:

Factor of timeyield in making steel in the electric arc furnace

med dvema popraviloma ognjevzdržne obzidave za značilen primer trajanja obnove obzidave $t_p = 20$ h in za različne vzdrževalne oziroma čakalne časa. Praviloma je izraba časa za večja časovna obdobja večja: pri določitvi letnega faktorja izrabe časa moramo upoštevati vse one mrtve čase, ki bodo nastopili v celoletnem obdobju, pri določitvi mesečnega faktorja pa one, ki se pojavijo v toku enega meseca. Nastopanje dogodkov, ki pomenijo zastoj proizvodnje, pa ni premosorazmerno s časom, ampak je odvisno od verjetnosti, ki opisuje zakonitosti teh dogodkov, imenovana tudi kumulativna Poissonova porazdelitev. Če predpostavimo, da sodeluje v proizvodnem sistemu elektroobložna peč — jeklarina tolikšno število elementov s takšnim faktorjem izpada, da bo z verjetnostjo $p = 0,995$ v teku enega dne nastal en dogodek, ki pomeni zastoj proizvodnje, bodo pri enaki verjetnosti nastali v teku enega meseca štirje takšni dogodki, v teku enega leta pa ca. petdeset. Glede na velikost opazovanega obdobja procentualni deleži zastojev padajo, faktor izrabe časa pa zato raste. Če poleg opisane izrabe časa upoštevamo še izkoristek (i) kot delež odlieteja jekla v masi metala ene šarže, lahko definiramo kot letno proizvodnjo elektroobložne peči:

$$Q1 = nli\dot{c} \cdot i \cdot T_v \cdot tl / t\dot{s}$$

Z upoštevanjem že izvedenih relacij pa dobimo končno obrazec

$$Q1 = nli\dot{c} \cdot i \cdot \frac{T_v \cdot tl}{\frac{625}{pnt} + t_o}$$

Pri čemer so:

- nlič — letna izraba časa
- i — izplen
- T_v (t) — teža vložka
- tl (h) — letne obratovalne ure
- tš (h) — čas šarže
- to (h) — ostali čas
- pnt (kVA/t) — specifična moč pečnega transformatorja

Na podlagi tipičnih vrednosti za izkoristek $i = 0,88$ ter za letno izrabo časa $nli\dot{c} = 0,78$ so v tabeli VII zbrane vrednosti letne možne proizvodnje elektroobložnih peči pri različnih tehnoloških postopkih (t_o) in pri različnih letnih obratovalnih urah (tl).

Tabela VII: Letna možna proizvodnja elektroobložne peči (t)

	pnt (kVA/t)	$T_v = 30t$			$T_v = 50t$			$T_v = 70t$		
		$t_o = 1h$	$t_o = 1,5h$	$t_o = 2h$	$t_o = 1h$	$t_o = 1,5h$	$t_o = 2h$	$t_o = 1h$	$t_o = 1,5h$	$t_o = 2h$
$tl = 8400$ h	200	41900	37400	33700	69800	62300	56200	97800	87200	78700
	300	56100	48200	42300	93400	80400	70500	130800	112500	98800
	400	67400	56400	48500	112400	94100	80800	157400	131700	113200
	500	76800	62800	53200	128000	104700	88600	179200	146700	124100
	600	84700	68000	56800	141100	113300	94700	197500	158700	132600
	700	91300	72200	59800	152200	120000	99500	213100	168500	139500
$tl = 6000$ h	200	29900	26700	24100	49900	44500	40100	69800	62300	56200
	300	40000	34500	30200	66700	57400	50400	94300	80400	70600
	400	48200	40300	34700	80300	67200	57800	112400	94100	80900
	500	54900	44900	38000	91500	74800	63300	128100	104800	88600
	600	60500	48600	40600	101800	80900	67600	141100	113400	94700
	700	65300	51600	42700	108700	86000	71100	152200	120400	99600

Pri obravnavi »ostalega« časa izdelave šarže je potrebno vedeti, kakšna jekla se v elektroobložni peči izdelujejo in kakšna tehnologija se pri tem uporablja. Pri klasični tehnologiji izdelave nizkolegiranih jekel se po raztalitvi izvede oksidacija z vpihovanjem kisika v talino, nato se z ustrezno stopnjo bazičnosti žilindre ob pravilnem segrevanju izvrši odfosforenje in delno odžveplanje. Pri popolnejši rafinaciji je potrebno zamenjati oksidacijsko (črno) žilindro ter desoksidirati talino, nadaljnje odžveplanje in redukcija z belo žilindro pa zahteva zaradi počasnih difuzijskih procesov dolge izdelovalne čase. Moderni hitri postopki pospešujejo predvsem difuzijske procese z vpihovanjem praškastih dodatkov ter s sprotno menjavo črne žilindre; tudi sifonski ali ekscentrični izliv šarže omogočata hitro ločitev žilindre od jekla, z dodajanjem legur in končnih desoksidantov v ponovco pa se izdelovalni čas skrajša pod 1 h. V kombinaciji z izvenponovčno sekundarno ali konvertorsko tehnologijo je bila razvita vrsta postopkov in naprav (AOD, VOD, RH, DH), ki so omogočili doseganje zelo nizkih vrednosti C, H, N, S, P, s to prednostjo, da se v elektroobložni peči izvede le raztalitev in segretje taline na določeno temperaturo ter eventualna oksidacija in odfosforenje.

Tehnologija izdelave visokolegiranih kromovih jekel z nizkim ogljikom temelji na preprečevanju oksidacije kroma pri istočasnem razogljčenju taline. Po klasičnem postopku je bilo to mogoče doseči le z intenzivnim vpiho-

vanjem kisika v talino ter z segrevanjem te nad 1900°C , kar je zahtevalo zato dodatne desoksidacijske postopke, hlajenje pregrete taline z nizkoogljčnim vložkom ali s ferokromom pa je dražilo proizvodnjo. Z moderno vakuumsko oksidacijo v posebni ponovci dosežemo pri znižanem pritisku dobro oksidacijo ogljika, ne da bi pri tem utrpeli odgor kroma; preprihanje taline z argonom omogoča homogenizacijo in hlajenje taline, izdelovalni čas v obložni peči se je pri tem reduciral le na taljenje vložka ter delno predoksidacijo.

Tudi pri tehnologiji izdelave visokolegiranih jekel se je izvršil premik od časovno zahtevne tehnologije z dvema žilindroma k izvenponovčnim postopkom, ki so obložni peči prepustili le taljenje in oksidacijo. V ponovci, ki ima sisteme za računalniško spremljanje celotnega procesa ter naprave za dogrevanje taline, se pod strogo nadzorovanimi pogoji — z avtomatskim doziranjem energije in metalnih oziroma nemetalnih dodatkov —, dosega zanesljiva ponovljivost izdelovalnih postopkov, ker je omogočilo zožitev legirnih toleranc ter izdelavo jekel z načrtovanimi fizikalnimi lastnostmi. V vsakem primeru postaja elektroobložna peč za proizvodnjo jekla vedno bolj le visoko produktivni, proizvodno zelo elastičen talilni stroj z odprtimi možnostmi nadaljnega izboljševanja vodenja procesa in zniževanja specifičnih materialnih in energijskih potroškov.

LITERATURA:

1. B. Bowman: Trends in electrical parameters of arc steelmaking furnaces, *Elektrowärme International* 37 (1979)
2. E. Markworth: Elektrische Auslegung für neuzeitliche Betriebsweisen von Lichtbogenofen — Schmelzofen, *Elektrowärme International* 39 (1981)
3. E. Markworth: Möglichkeiten einer Leistungssteigerung beim Betrieb von Lichtbogen — Schmelzofen mit wasserführender Gefäßzustellung, *Stahl und Eisen* 100 (1980)
4. E. Schwabe: Electric furnace problems: design and operating requirements for UHP arc furnace melting prerduced charge materials, *UIE* 1976
5. K. Schmermer: Verminderung des Eischmelzstromverbrauches des Lichtbogenofens durch Ausnutzung der in Abgass enthaltene Wärme zum Schrotverwärmen, *Elektrowärme International* 39 (1981)
6. H. Berger: Die elektrische und mechanische Auslegung des Elektrolichtbogenofens, *Radex Rundschau* (1980) 1
7. G. Pfeifer: Elektrische Auslegung und Ausrüstung von Lichtbogenofen, *Radex Rundschau* (1984) 2
8. S. Koele: Lineares elektrisches Ersatzschaltbild von Drehstromlichtbogenofen, *UIE* 1984
9. M. Sakulin: Studie über die elektrische Verhalten des Dreifasenlichtbogenofen, *UIE* 1984
10. J. Bratina: Optimalno obratovanje obložne peči za proizvodnju jekla, *Energetika in zaštita okolja u crnoj metalurgiji* 1984
11. F. Wheeler: The evaluation of arc furnace performance, 42th Electric furnace conference, Toronto 1984
12. J. Udoh: New EAF operating technology aiming at laborsaving, energysaving and costreduction in Japan, 4th Arc furnace meeting, Budapest 1985
13. M. Karbowiczek: Optimatization of the work parameters of steelmaking process, 4th Arc furnace meeting, Budapest 1985
14. B. Bowman: Optimum use of elektrodos in arc furnace, *Metalurgical plant and technology* 1, 1983
15. R. Bulajić: Električki i toplotni parametri trofaznih lučnih peči, *Nikšić* 1986

ZUSAMMENFASSUNG

Es wird die geschichtliche Entwicklung des Lichtbogenofens zur Erzeugung von Stahl über die technischen und technologischen Entwicklungsphasen gezeigt. Durch diese war es möglich, die Bedeutung des Lichtbogen — Schmelzofens laufend zu steigern so, dass der Anteil von Elektro Stahl an der Weltrohstahlerzeugung inzwischen schon nahe 25 % liegt. Die Elektroenergetischen Eigenheiten des Lichtbogen — Schmelzofens, dessen Einflüsse auf das Speisungsnetz so wie die Betriebsbedingungen im Bezug auf eine rationelle Ausnutzung elektrischer Leistung im elektroenergetischen System werden angegeben. Ein Vergleich der energetischen und wärmetechnischen Besonderheiten des üblichen (RP) und eines Hochleistungslichtbogenofens (UHP) bestätigen eine dauernd anwesende Tendenz zur bessern Energieausnutzung und höheren Produktivität des Ofens. Die Methode zur Bestimmung der realen elektrotechnischen Werte des Lichtbogen — Schmelzofens, bzw. der realen Betriebszustände, welche von entscheidender Bedeutung für die Führung des Lichtbogenofens während der Einschmelzzeit, wie auch nach der Verflüssigung der Einsatzstoffe sind, werden angegeben.

Die Optimierung des Schmelzvorganges ist nicht nur auf die Bestimmung der Bedingungen zur Erreichung der grössten Lei-

stung am Lichtbogen oder für eine maximale Energieausnutzung bechränkt, sondern breitet sich aus von der Energieoptimierung auf die Kostenoptimierung, wo neben der Kosten für die elektrische Energie und der festen Kosten noch die Kosten für das feuerfeste Material und den Verbrauch von Graphitelektroden berücksichtigt werden. Die Energie und Kostenberechnungen im Verlauf einer Schmelzperiode bei variierenden Betriebszuständen ermöglichen die Bewertung verschiedener Einschmelzvarianten des Lichtbogenschmelzofens. Die Ergebnisse der Kostenoptimierung bestätigen die Richtigkeit der Ofenführung eines klassischen Ofens, normaler Leistung (RP) bei niedrigem Leistungsfaktor $\cos \varphi < 0,60$ (kurzer Lichtbogen), bzw. die Richtigkeit der Ofenführung eines modernen Hochleistungs — Lichtbogenofens mit wassergekühlten Wandelementen bei hohem Leistungsfaktor $\cos \varphi > 0,82$ (langer Lichtbogen).

Anweisungen für eine kostenoptimale Prozessführung im gesamten Verlauf einer Schmelze werden gegeben.

Eine mögliche Jahresproduktion des Lichtbogen — Schmelzofens in Hinsicht der Betriebszeitausnutzung, des Einsatzgewichtes, der spezifischen Leistung vom Ofentransformator, und in Abhängigkeit von den nötigen Einschaltzeiten wird behandelt.

SUMMARY

Historical development of the electric arc furnace for steelmaking is presented. Technical and operational improvements enabled that nearly 25 % of steel is produced in these furnaces in the world. Further, electroenergetic characteristics of the furnace, their influence on the electric supply network, and operational conditions in respect to rational use of electric power in the power system are given. Comparison of energy and heat-engineering characteristics of a regular-power and ultra-high-power furnace confirm the fact that the tendency to improve the electric yield and to increase the furnace output is still present. Methods to determine the real electrical operational parameters of the arc furnace, and thus the real electrical operational parameters of the arc furnace, and thus the real operational conditions which are essential during the burden melting and when burden is molten are given too. Optimising the operation is not limited only to determining the conditions for achiev-

ing the highest power of arc or maximal energy yield but it is extended also to the optimization of costs taking in account consumption of refractory materials and graphite electrodes next to the energy and fixed costs. Energy and cost evaluations during the manufacturing process under variable operational conditions enable to appreciate various melting procedures in the arc furnace. Results of cost optimization confirm that correct operation of standard ultra-high-power arc furnace is at low $\cos \varphi < 0,60$ (short arc), and correct operation of modern arc furnace with water-cooled panels at high $\cos \varphi > 0,82$ (long arc); instructions for the optimal-cost control of the process during the complete manufacturing cycle are given. Also the annual output of arc furnace from the viewpoint of operational time, burden weight, specific power of furnace transformer, and necessary operational times is discussed.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведено описание исторического развития электрической дуговой печи для производства стали, а также ее технологических и технических фаз. Ее благоприятные свойства дали возможность, что теперь прибл. около 25 % мирового производства стали выполняется в дуговой печи.

Приведены электроэнергетические данные электродуговой печи, их влияние на питающее напряжение, также условия работы что касается рационального использования электрической мощности в электроэнергетической системе.

Сравнение энергетических и теплотехнических особенностей печи обыкновенного объема (Regular Power) и печи большой мощности (Ultra regular Power) подтверждают ещё, что всё ещё существует тенденция в направлении чем больше израсходовать электрическую энергию и чем больше улучшить производительность этого агрегата.

Приведены методы для определения реальных электротехнических значений дуговой печи, отн. реальных видов работы, которые имеют решающее значение для управления ходом печи как в течении выполнения расплавления как и во время уже расплавленной загрузки.

Оптимизация работы печи не ограничена только на определение условий для достижения самой большой мощности

на дуге печи или же на максимальное энергетическое использование, а распространяется от энергетического на оптимизацию расчёта, которая берет во внимание не только энергетические и постоянные расходы ещё расходы на огнеупорный материал и для затрату графитных электрод.

Расчёты по энергии и прочих расходов во время изготовления плавки с изменяемыми состояниями работы дают возможность оценить разные виды расплавления в электродуговой печи. Результаты оптимизации расходов подтвердили правильность работы классической дуговой печи большой мощности при низких фазах $\cos \varphi$ мене 0,60 (короткая дуга), относительно правильность работы современной дуговой печи с панелями на охлаждение с водой при факторах $\cos \varphi$ свыше 0,82 (длинная дуга), приведены указания для чем более благоприятное управление процессом с точки зрения расходов в течении изготовления плавки.

Рассмотрена возможное годовое производство электрической дуговой печи в отношении на использование времени работы, веса загрузки, удельной мощности поперечного трансформатора и зависимости от необходимой длительности процесса в дуговой печи.